

Modelos ecológicos conceptuales de selva baja subcaducifolia y selva mediana subperennifolia perturbadas por incendios

Conceptual ecological models of subdeciduous lowland forest and subevergreen medium forest disturbed by fires

Recepción del artículo: 24/01/2024 • Aceptación para publicación: 06/03/2024 • Publicación: 01/05/2024

● <https://doi.org/10.32870/e-cucba.vi22.348>

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.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8295-1744>

Ana Graciela Flores Rodríguez*

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

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1544-2077>

Refugio Ramón Rivera Leyva

Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias. Campo Experimental Mocochoá, Centro de Investigación Regional del Sureste, INIFAP. México.

ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-4024-250X>

Mónica Edith Lomelí Zavala

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

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8344-3568>

*Autor para correspondencia:

ana1386@hotmail.com

Resumen

El concepto de modelos ecológicos contribuye a contextualizar los posibles escenarios hacia los cuales la dinámica de un ecosistema forestal puede dirigirse después de sufrir un incendio forestal. No obstante, aunque en México se han definido algunos modelos ecológicos relacionados con el impacto de los incendios en ecosistemas templados, son escasos los modelos orientados a ecosistemas tropicales. De acuerdo con esto, en este trabajo se presentan dos modelos ecológicos conceptuales de ecosistemas forestales tropicales sensibles al fuego, de la península de Yucatán: la selva baja subcaducifolia y la selva mediana subperennifolia. Desarrollados con una lógica inductiva-deductiva cíclica, siguiendo: a) descripción de los ecosistemas forestales con base a cierto nivel de empirismo, derivado de la experiencia en incendios forestales; b) reducir la complejidad de la dinámica del ecosistema en relación a la ocurrencia de incendios forestales, a través de un proceso de deducción y establecer hipótesis de posibles escenarios de respuesta; y c) clasificar conocimiento y entendimiento acumulado de la respuesta de los ecosistemas que se ha obtenido del pasado y presente, para extrapolar hacia el futuro. Lo anterior ayudó a determinar los escenarios de la potencial dinámica de los ecosistemas con, o sin, la presencia de incendios forestales.

Palabras clave: Efectos del fuego, regeneración, resiliencia, ecosistemas sensibles al fuego, severidad de incendios forestales, sucesión.

Abstract

The concept of ecological models helps to contextualize the scenarios towards which the dynamics of a forest ecosystem can be directed, after being affected by a forest fire. However, although some ecological models related to the impact of fires in temperate ecosystems have been defined in Mexico, there are few models aimed at tropical ecosystems. In accordance with this, in this work two conceptual ecological models of fire-sensitive tropical forest ecosystems of the Yucatan Peninsula are presented: the low subdeciduous forest and the medium subevergreen forest. Developed with a cyclical inductive-deductive logic, following: a) description of forest ecosystems based on a certain level of empiricism, derived from experience in forest fires; b) reduce the complexity of ecosystem dynamics in relation to the occurrence of forest fires, through a deduction process, and establish hypotheses of possible response scenarios; and c) classify the accumulated knowledge and understanding of ecosystem response that has been obtained from the past and present, to extrapolate to the future. The above helped determine the scenarios of the potential dynamics of ecosystems with, or without, the presence of forest fires.

Keywords: Fire effects, resilience, regeneration, severity of forest fires, succession, fire-sensitive ecosystems.

Introducción

El cambio climático y las actividades humanas están produciendo un incremento en la ocurrencia de incendios forestales (Withey *et al.* 2018). El nivel de impacto de un incendio forestal dentro de un ecosistema, depende de condiciones, como: el tipo de vegetación, el régimen del fuego, de los combustibles (cantidad, calidad y distribución), las condiciones meteorológicas, la topografía, la ignición, la propagación, los efectos del fuego y la sucesión vegetal (Pompa-García *et al.* 2012). La clasificación de los ecosistemas con base en su relación con el fuego considera que las especies arbóreas tropicales típicas de selvas son sensibles al fuego (Shlisky *et al.* 2007), debido a que presentan menos adaptaciones a su impacto, lo cual causa mayor mortalidad en los individuos (Rodríguez *et al.* 2011). Sin embargo, se ha reportado que en ecosistemas con abundancia de arbolado de la familia de las leguminosas y con pastos como componente natural en el sotobosque, tienen posibilidades de estar relacionadas con el fuego (Rodríguez-Trejo. 2014). Mas aún, características consideradas como adaptaciones al fuego como la corteza gruesa (Pausas. 2015), regeneración por semilla en sitios incendiados, semilla con latencia física o pireno y capacidad de rebrotación o rebrotación por rizomas (Corrêa *et al.* 2019), se registran en especies tropicales como *Bauhinia unguolata*, *Acacia cornígera*, *Byrsonima crassifolia* y *Lonchocarpus sp.*, por mencionar algunas (Rodríguez-Trejo, 2019).

Los cambios en el régimen de incendios pueden favorecer a diferentes grupos de especies, lo que lleva a cambios en comunidades vegetales a lo largo del tiempo (Corrêa *et al.* 2019). Para entender esta interacción es necesario el estudio de los ecosistemas afectados por incendios, de las estrategias regenerativas de las especies arbóreas y de los factores ecológicos y del comportamiento del fuego que influyen en la regeneración después de un incendio (Madriral Olmo *et al.* 2009). Para interpretar esta interacción, es muy útil la esquematización en modelos ecológicos de los escenarios potenciales a diferentes niveles de impacto de los incendios (Blanco. 2013), que ilustren hacia donde puede dirigirse la dinámica de los ecosistemas forestales, bajo diferentes regímenes del fuego (CONANP y TNC, 2009). Sobre ecosistemas templados adaptados al fuego, como los bosques de coníferas, existen algunos modelos ecológicos (Ocampo-Zuleta. 2019), sin embargo, la esquematización de la interacción del fuego en ecosistemas sensibles al fuego es muy escasa.

De acuerdo con lo anterior, se requiere definir estrategias de análisis orientadas a simplificar la comple-

jididad de la dinámica de los ecosistemas perturbados por el fuego (Blanco, 2013). Más aún, entre más simple sea el modelo se facilita y agiliza, no solo la definición de propuestas teóricas, sino también el poder probarlas. No obstante, esta simplificación puede implicar el uso de análisis complejos, además de identificar y basarse en procesos ecológicos relevantes (Blanco, 2013). Para desarrollar un modelo ecológico, se debe especificar el objetivo, que en este caso es explicar la dinámica y la tendencia de los ecosistemas forestales, al ser perturbados por el fuego. Específicamente, se espera que el modelo ecológico pueda dar una idea de la respuesta del ecosistema bajo diferentes niveles de ocurrencia. Para esto, se requiere contar con información estructurada sistemáticamente, que puede derivarse tanto de procesos de investigación, o de conocimiento resultante de la continua gestión sobre estos ecosistemas (Jakeman *et al.* 2008). De acuerdo con esto, se esperaría que el modelo pueda predecir la respuesta del ecosistema forestal si existe un cambio en las condiciones ambientales provocado por la ocurrencia de un incendio. De esta manera, el objetivo del presente trabajo es definir un modelo ecológico para selva baja subcaducifolia y uno para selva mediana subperennifolia, que se ubican en la península de Yucatán, considerados sensibles al fuego. Estos modelos presentan un panorama general de la tendencia de la respuesta de la vegetación ante la ocurrencia de incendios forestales.

Materiales y métodos

Descripción del área de estudio

La península de Yucatán es un terreno plano, donde predominan suelos calizos con gran cantidad de cavernas con corrientes de agua subterránea (Duno *et al.* 2018). La temperatura media anual es de 26°C, con un gradiente de precipitación que va de 450 mm a 1500 mm (Estrada y Cobos, 2016). La diversidad de especies, para la flora vascular es de: 168 familias, 970 géneros y 2,327 especies (Duno *et al.* 2018), distribuidas en diferentes tipos de vegetación de climas tropicales (Flores y Espejel, 1994).

Ubicación de escenarios

La evaluación se basó en entrevistas semiestructuradas, apoyada en un guion de preguntas cerradas complementadas con una serie de preguntas abiertas. De esta forma se obtuvo información general sobre los aspectos de los incendios y por otra parte información específica para cada tipo de vegetación. La consulta se realizó con: 1) expertos del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias que han trabajado en diversos proyectos relacionados con el tema de los incendios forestales; 2) con combatientes de incendios

forestales pertenecientes a brigadas tanto estatales como comunitarias; y 3) con ejidatarios y campesinos propietarios de zonas incendiadas. Para ejemplificar la información aportada, se hicieron algunos recorridos en transectos específicos donde se realizó una evaluación visual de los efectos del fuego en los ecosistemas (Tricone y Anderson, 2020), esto con el propósito de detectar variaciones espaciales en cuanto a la respuesta de los ecosistemas ante los incendios forestales, buscando zonas que reflejaran diferentes condiciones y temporalidades de la ocurrencia de incendios. Específicamente, se realizaron transectos en áreas naturales protegidas, áreas de amortiguamiento y áreas que no están bajo ninguna categoría de protección, ubicando zonas: a) afectadas por incendios forestales; b) sin afectación por incendios forestales; y c) donde, por consecuencia de los incendios, se manifiestan cambios de vegetación. Cada área se diferenció en cuanto a su estructura, composición y densidad. Además, se consultaron los reportes de los incendios en la zona, de acuerdo al año de ocurrencia, época, duración, intensidad, área afectada, tanto de CONAFOR (Sistema Nacional de Información Forestal) como de CONABIO (Sistema de Alerta Temprana de Incendios). Con esta información, se desarrolló un proceso analítico inductivo (de lo particular a lo general) y deductivo (de lo general a lo particular), para definir los escenarios posibles después de un incendio. Desde la perspectiva deductiva, a través de los patrones regionales de distribución de la vegetación, se puede evaluar, en general, el impacto del fuego diferenciado por cada uno de los tipos de vegetación estudiados.

La información generada se integró en modelos ecológicos conceptuales de manera cualitativa. De esta forma, se establecieron una serie de escenarios (condiciones del ecosistema) para orientar la respuesta del ecosistema a diferentes condiciones de impacto del fuego. Para esto fue importante especificar tanto el régimen (años), como la severidad del fuego (visual), sin embargo, se deberán hacer evaluaciones más específicas para la definición de un modelo ecológico cuantitativo.

Generación de modelos ecológicos

Los modelos ecológicos se desarrollaron con base a una lógica inductiva-deductiva cíclica (Blanco, 2013). Implementando los siguientes procesos (Feinsinger, 2013; Dávila, 2006; Finol y Vera, 2020):

a) *Conocer*. En esta fase se realizó una descripción de los ecosistemas forestales estudiados, lo cual se basó en cierto nivel de empirismo derivado de la experiencia de combatientes de incendios forestales. Con base en esto,

se procedió a inducir conclusiones, que mejoraron al implementar funciones teóricas tendientes a explicar las posibles respuestas ante los incendios forestales.

b) *Entender*. Se buscó reducir la complejidad de la dinámica del ecosistema con relación a los incendios forestales, a través de un proceso de deducción, con el propósito de establecer hipótesis de las posibles tendencias de la dinámica del ecosistema de acuerdo con el nivel de incendios forestales.

c) *Predecir*. A través de la coordinación del conocimiento y entendimiento acumulado del pasado y presente, derivado de los procesos anteriores, se extrapoló hacia el futuro. Esto implicó determinar cuál sería la respuesta que se esperaría, a través del tiempo, de un ecosistema forestal bajo diferentes escenarios de impacto (niveles de severidad) del fuego.

Resultados y discusión

Selva baja subcaducifolia

Este modelo ecológico parte del escenario inicial de selva baja subcaducifolia adulta, que se considera no afectada por un incendio forestal, ya que no se ha presentado un incendio en los últimos 25 o 30 años. En este ecosistema, los árboles presentan alturas entre los 15 y 20 metros y diámetros entre 20 y 30 cm. Esta condición implica la dominancia de ciertas especies del estrato arbóreo, que representan 6 familias y 13 géneros (Cuadro 1). Donde, por su condición de selva adulta, la vegetación disminuye en densidad y diversidad, a medida que va creciendo. Comparativamente, con base a la información recabada en las entrevistas, en una selva de 5 a 10 años se tiene en promedio entre 15 y 20 mil plantas por hectárea, lo cual, a medida que crece, va disminuyendo, llegando, en el estatus de una selva adulta, a una densidad 30% menor y a la dominancia de pocas especies. Esta tendencia se mantiene, teóricamente, siempre y cuando no se tenga presencia de una perturbación.

La época en la que la ocurrencia de incendios forestales es más propensa, es la época de sequías, cuyo comportamiento deriva en una altura promedio de llama de 35 cm, llegando hasta los 50 cm en lugares de mayor acumulación de combustible (personal combatiente de incendios). Este comportamiento obedece a que, por la densidad del dosel, no hay mucho movimiento de corrientes que favorezcan la propagación del fuego (Parra-Lara *et al.* 2010), este comportamiento ha sido reportado en selva baja de Chiapas, donde el incendio es de baja intensidad y baja severidad mostrando una supervivencia alta (95%) del arbolado (Rodríguez Trejo *et al.* 2019).

Cuadro 1. Especies dominantes por condición de selva, sin ocurrencia de incendio, en la península de Yucatán.

Familia	Nombre común	Nombre científico	Ecosistema
Arecaceae	Coyul	<i>Acrocomia aculeata</i> (Jacq.) Lodd. Ex Mart.	SMS
Burseraceae	Chaka	<i>Bursera simaruba</i> (L.) Sarg	SBS, SMS
Fabaceae	Kitinche	<i>Caesalpinia gaumeri</i> Greenm	SBS, SMS
Polygonaceae	Boob	<i>Coccoloba barbadensis</i> Jacq.	SBS, SMS
Polygonaceae	Sak boob	<i>Coccoloba spicata</i> Lundell	SMS
Euphorbiaceae	Ya'ay tiik	<i>Gymnanthes lucida</i> Sw.	SMS
Polygonaceae	Tsitsilche'	<i>Gymnopodium floribundum</i> Rolfe	SBS, SMS
Malvaceae	Majaua	<i>Hampea trilobata</i> Standl.	SMS
Fabaceae	Chukum	<i>Havardia albicans</i> (Kunth) Bitton & Rose	SMS
Euphorbiaceae	Pomolché	<i>Jatropha gaumeri</i> Greenm.	SMS
Fabaceae	K'anasín	<i>Lonchocarpus rugosus</i> Benth	SBS, SMS
Malvaceae	K'askáat	<i>Luehea speciosa</i> Willd.	SMS
Fabaceae	Tzalam	<i>Lysiloma latisiliquum</i> (L.) Benth.	SBS, SMS
Sapotaceae	Zapote	<i>Manilkara zapota</i> (L.) P. Royen	SBS, SMS
Anacardiaceae	Chechen	<i>Metopium brownei</i> (Jacq.) Urb.	SBS, SMS
Fabaceae	Catzin blanco	<i>Mimosa bahamensis</i> Benth.	SBS
Polygonaceae	Tzaitzá	<i>Neomillspaughia emarginata</i> (H. Gross) S. F. Blake	SBS, SMS
Fabaceae	Jabín	<i>Piscidia piscipula</i> (L.) Sarg.	SBS, SMS
Myrtaceae	Guayabillo	<i>Psidium sartorianum</i> (O. Berg) Nied.	SMS
Rubiaceae	Crucetillo	<i>Randia truncata</i> Greenm. & C.H. Thomps.	SMS
Arecaceae	Huano	<i>Sabal japa</i> (C. Wright Ex Becc.)	SBS, SMS
Fabaceae	Box catzín	<i>Senegalia gaumeri</i> (S. F. Blake) Britton & Rose	SBS
Anacardiaceae	Jobo	<i>Spondias mombin</i> L.	SMS
Sapindaceae	Kolok	<i>Talisia floresii</i> Standl.	SMS
Lamiaceae	Ya'axnik	<i>Vitex gaumeri</i> Greenm.	SMS

SBS: selva baja subcaducifolia; SMS: selva mediana subperennifolia.

Como respuesta al incendio forestal, la regeneración se presenta tanto como resultado de la germinación de semillas, como a través de rebrotes (Figura 1). Dentro de esta dinámica, destaca la abundancia de matorrales y herbáceas y existe alta sobrevivencia de especies arbóreas, como es el caso del jabín (*Piscidia piscipula*) y una alta regeneración de palmas y miembros de la familia Fabaceae (Rocha *et al.* 2010). Referente a especies de esta familia, en experimentos sobre germinación a diferentes temperaturas específicamente del género *Ulex*, presentan estimulación por el efecto del fuego (Casal *et al.* 2011). Por lo tanto, en estos ecosistemas eventualmente, después de la ocurrencia de un incendio moderado, si no se presentan nuevos incendios, el ecosistema se restaura. Sin embargo, si el incendio se manifiesta con un comportamiento más

severo (llamas superiores a 50 cm) el proceso de restauración es lento, porque, en algunos casos, se parte del establecimiento de una selva nueva.

Otro escenario se define cuando se tienen incendios forestales con frecuencia entre 1 a 3 años (Figura 2), lo cual define unas severidad del fuego baja, en este caso el ecosistema se tiene que renovar frecuentemente, por lo que el proceso de sucesión tiende al establecimiento de matorral espinoso, donde abundan las familias Convolvulaceae, Apocynaceae, Fabaceae, Asteraceae, Rubiaceae, Euphorbiaceae, Poaceae, Rhamnaceae, encontrándose también vegetación anual, como el Tajonal (*viguiera dentata* (Cab.) Spreng.), de la familia Asterácea (Figura 3).

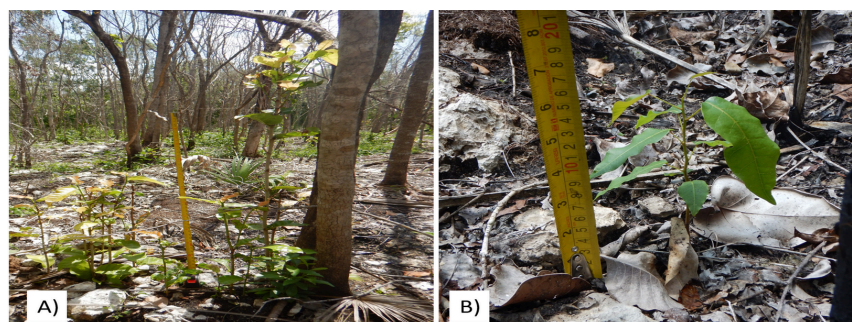


Figura 1. Proceso de regeneración, en una selva baja subcaducifolia adulta, después de un incendio: A) por rebrote; B) por semilla.



Figura 2. Incendio forestal que se presenta en intervalos de 1 a 3 años en una selva baja subcaducifolia joven.

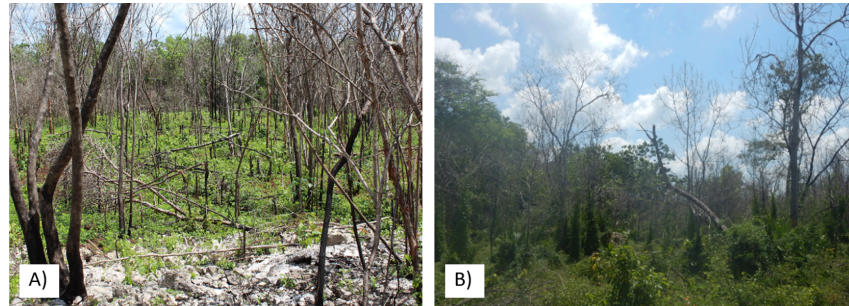


Figura 3. A) Selva baja subcaducifolia con incendios frecuentes (1-3 años); B) Restauración después de un incendio, donde predomina el establecimiento de los estratos arbustivos y herbáceos.

El modelo ecológico (Figura 4), partiendo de una selva subcaducifolia adulta relativamente permanente, hasta que sea alterada por un incendio forestal, que puede presentarse en forma moderada y severa. El primer caso es más frecuente, la tendencia puede ser hacia una selva subcaducifolia joven o a una con vegetación secundaria.

Sí se aumenta la frecuencia de los incendios, el escenario puede ser el de un matorral espinoso o achual Joven (Camargo-Ricalde, 2000) donde el impacto del fuego puede llegar a ser alto. Una vez que se evita la ocurrencia de incendios, el proceso de restauración, en ambos casos (vegetación secundaria o matorral), tiende hacia una condición de selva baja subcaducifolia joven, para después

pasar a consolidarse como una selva adulta. Por otra parte, con incendios severos, la selva subcaducifolia adulta tiende a ser desplazada por pastizales entrando a un proceso de formación de sabanas (Cochrane, 2001), de igual manera es probable que de presentarse incendios frecuentes, se irán eliminando las especies sucesionalmente avanzadas en selvas bajas, hasta sabanificarse o quedar como vegetación secundaria (Rodríguez-Trejo, 2014). A partir de esto, el proceso de restauración es más lento, ya que pasa primeramente por la condición de matorral espinoso, proclive a una selva joven y continuar a selva adulta, es importante señalar que no se puede contemplar el concepto de evolución de

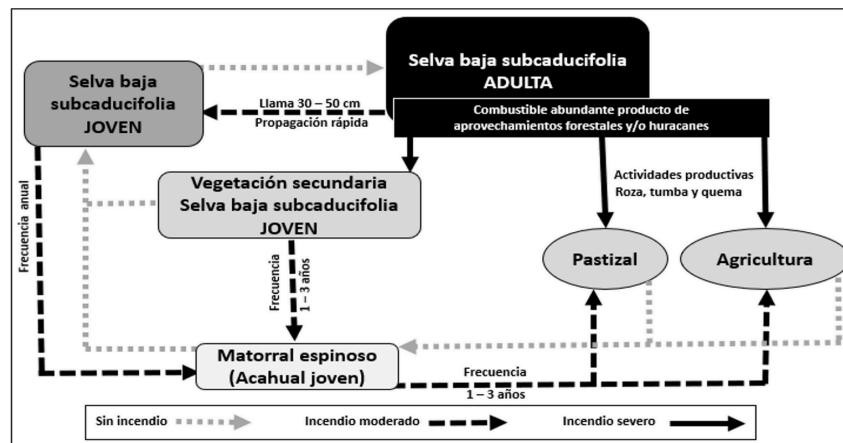


Figura 4. Modelo ecológico que parte de una condición de selva baja subcaducifolia adulta e ilustra los posibles escenarios en relación a la ocurrencia de incendios forestales (Adaptado de Flores et al., 2020). *debido a que al cambio de uso de suelo puede ser propiciado por otras causas, en este modelo se consideran los cambios de uso de suelo a partir de incendios forestales.

un tipo de vegetación a otro ya que esto tiene una connotación de adaptación. El Cuadro 2 describe algunos aspectos que caracterizan las posibles condiciones que pueden propiciarse, en relación a la dinámica que se define por el impacto del fuego.

de la familia Aracaceae, como: *Sabal japa* (C. Wright. ex Becc.) y especies arbustivas, como *Bravaisia berlandieriana* (Nees) T.F. Daniel.; *Helicteres baruensis* Jacq.; *Bunchosia swartziana* Griseb.; *Randia truncata* Greenm. & C. H. Thomps.; *Jatropha gaumeri* Greenm.; y

Cuadro 2. Características de las condiciones alternativas a las que puede propender un ecosistema de selva baja subcaducifolia (en relación a la ocurrencia de incendios forestales presentado en el modelo ecológico de la figura 4) (Adaptado de Flores *et al.* 2020).

Características	SBS Adulta	SBS Joven	VS-SBS Joven	ME	Pastizal	Agricultura
Condición	Pocas especies de arbolado, baja densidad y poca competencia.	Sobrevivencia de arbolado	Arbolado escaso. Dominio de matorrales y herbáceas	Dominan especies de matorrales y herbáceas	Vegetación anual	Vegetación arbustiva
Edad (años)	20 - 30	10 - 20		1 - 5		
Regeneración	Semillas y rebrotes	Mayormente rebrotes		Semillas y rebrotes	Semillas y rizomas	Semilla
Regeneración (individuos/ha)	97,000	157,000		97,000	300,000	7,000
Número de familias	Arbóreo: 17	Arbóreo: 15		Arbóreo: 7	Arbóreo: 5 Herbáceo: 3	1 o 2
Número de géneros	Arbóreo: 37	Arbóreo: 41		Arbóreo: 17	Arbóreo: 4 Herbáceo: 5	1 o 2
Densidad del arbolado (individuos/ha)	1,600	2,200		105	25 - 30	---
Diámetro normal	25 cm	15 cm		5 cm		---
Altura	15 - 20 m	10 m		3 m	40 cm	1.5 m
Capa de combustibles Cobert.	5 cm	5 cm		1.5 cm	1.5 cm	1.5 cm
Combustible Riesgo de incendio*	75 %	85 %		25 %	15 %	60 %
	Medio	Medio		Alto	Alto	Bajo

SBS Adulta: Selva baja subcaducifolia adulta; SBS Joven: Selva baja subcaducifolia joven; VS-SBS Joven: Vegetación secundaria de selva baja subcaducifolia joven; ME: Matorral espinoso (acahual joven); *Riesgo de incendio en base a disponibilidad potencial de combustibles.

Selva mediana subperennifolia

Este modelo ecológico parte de una selva mediana subperennifolia, de 20 a 25 años, preferentemente en condiciones de clima cálido subhúmedo, con precipitación media anual de 1,200 mm y una temperatura promedio de 27o C. Este ambiente favorece un mayor crecimiento de los árboles, así como una mayor diversidad de especies en comparación a la selva baja (Ochoa *et al.* 2018; García *et al.* 1992). Generalmente dominan 16 familias y 24 géneros (Figura 5A), aunque, eventualmente, si no hay presencia de incendios forestales, el número de familias tiende a disminuir, así como la densidad del arbolado, dominando solo algunas especies (Cuadro 1).

En estratos inferiores dominan las especies de palma

Callicarpa acuminata Kunth. Además de enredaderas del género *Ipomoea* (familia Convolvulácea), de los géneros *Arrabidaea* y *Cydista* (familia Bignoniácea) y plantas herbáceas como *Sida acuta* Burm. f. Si se presentan incendios moderados, sin otro tipo de perturbación, la vegetación de selva mediana tiende a ser dominada por alrededor de 13 familias y 19 géneros (Flores *et al.* 2023). Como estrategia de restauración, la regeneración del arbolado se establece tanto por semilla, como por rebrotes (Figura 5B).

Por lo general, cuando se presenta un incendio en la selva mediana, la flama es muy baja (Jardel *et al.* 2007), debido a que la densidad de la vegetación es muy densa y el viento no corre fuerte, lo cual disminuye la intensidad de

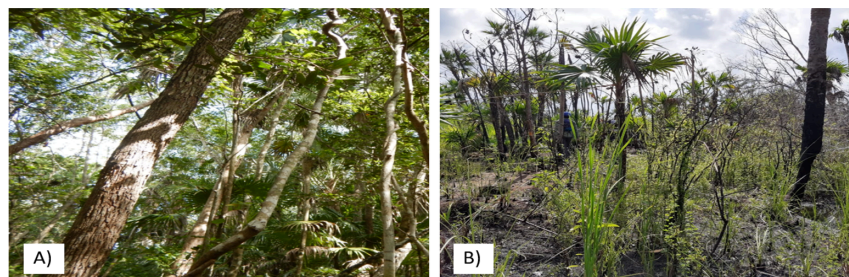


Figura 5. A) Selva mediana subperennifolia adulta, B) Regeneración una temporada de lluvias después de la ocurrencia de un incendio.

la intensidad de propagación del fuego. La alta humedad en la temporada de lluvias propicia que se degrade con rapidez gran parte de las hojas del suelo, disminuyendo la acumulación de material combustible. No obstante, esta vegetación frecuentemente es alterada por actividades humanas (Neri *et al.* 2009), las cuales producen gran cantidad de material combustible (desechos de arbolado y/o arbustos). Por lo tanto, en caso de ocurrir incendios forestales, se queman las áreas perimetrales de esta selva y si son frecuentes propician que se vaya perdiendo la diversidad de arbolado, lo cual favorece presencia de arbustos y hierbas (García *et al.* 1992). Como resultado de un incendio forestal, u otro factor de perturbación, la selva mediana subperennifolia llega a una condición denominada “acahual joven”, donde la regeneración del arbolado se establece tanto por rebrote, como por semilla; sin embargo, para que este ecosistema regrese a un estado de selva joven, se requiere un periodo prolongado sin perturbaciones (alrededor de 15 años). Se ha reportado para selvas en Chiapas que tras siete y dos años después de la ocurrencia de los incendios la riqueza de especies arbóreas, diversidad, equitatividad y densidad de la selva alta-mediana subperennifolia son bajas (Maldonado *et al.* 2009). Por el contrario, si los incendios se presentan en forma frecuente, la tendencia es hacia una pérdida de especies de arbolado, propiciando que la vegetación de matorral sea más abundante, si la recurrencia de incendios sigue, se establecen los pastizales, dando paso a áreas de sabana, casi siempre de especies invasoras o exóticas (Rodríguez-Trejo *et al.* 2020). Cuando la selva mediana subperennifolia es impactada severamente por algún evento de perturbación, como huracanes e incendios forestales, el arbolado se ve gravemente dañado, resultando en una alta mortalidad (Figura 6A), una estructura de la vegetación alterada y, en algunos casos a una sobrevivencia de solo el 3% de la vegetación original (García *et al.* 1992); lo cual, define condiciones para el establecimiento de vegetación de matorral, propiciando un ecosistema de acahual, que puede prolongarse entre 1 y 10 años dependiendo de la severidad del incendio, con

sobrevivencia de especies como *Psidium sartorianum* y *Talisia floresii* (Navarro y Granados, 1997).

Si los incendios forestales continúan de manera frecuente, la vegetación de la selva tendera a ser desplazada por matorral y posteriormente por pastizales (Neri-Pérez *et al.* 2009), propiciando actividades agropecuarias (Figura 6B). Esto debido a que la ocurrencia de incendios frecuentes facilita la sobrevivencia de plantas con meristemas subterráneos y biomasa predominantemente subterránea, como lo son los pastos (Simpson *et al.* 2019). Más aún, esta fragmentación de la selva mediana

subperennifolia puede reducir la posibilidad de incorporación de semilla, por lo tanto, afectará el establecimiento de la regeneración (Cochrane, 2003). Además, en ecosistemas normalmente libres de incendios, la fragmentación facilita el inicio de incendios forestales (Harrison *et al.* 2021).

El modelo ecológico de la selva mediana subperennifolia parte de una condición joven, que puede tender a dos escenarios generales (Figura 7): a) sin ocurrencia de incendios, que eventualmente define una selva adulta; b) con ocurrencia de incendios. Una vez que se tiene la selva adulta, y no hay presencia de fuego, esta se mantiene relativamente constante. Sin embargo, esta condición favorece la acumulación de combustibles.

La presencia de incendios es propiciada por actividades humanas, orientadas a favorecer actividades productivas. A partir de estas condiciones, el proceso de restauración debe pasar por varias etapas (matorral, acahual joven y acahual), siempre y cuando no se presente alguna perturbación.

Por otra parte, si en la selva mediana subperennifolia se presenta un incendio de severidad leve, puede tender a acahual. Mientras que si el incendio es severo se puede llegar a condiciones donde domina la vegetación de matorral o pastizales (Maldonado *et al.* 2009). Por el contrario, partiendo de la condición de matorral, si la ocurrencia de incendios es poco frecuente y de baja severidad, se puede tender a un acahual joven y continuar hacia una condición de acahual adulto, o directamente hacia el escenario de una selva mediana subperennifolia. También, si hay ausencia de incendios el matorral puede dirigirse a una condición de acahual adulto.

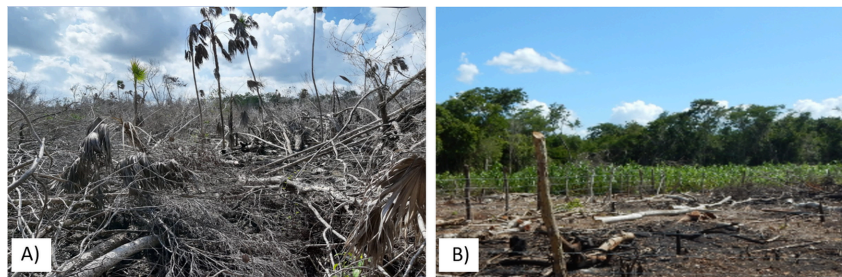


Figura 6. A) Selva mediana subperennifolia impactada por un incendio severo. B) Selva mediana subperennifolia desplazada por agricultura.

En el Cuadro 3 se presentan algunas características de las posibles variaciones a las que puede propender una selva mediana subperennifolia, como consecuencia de diferentes niveles de incendios forestales y su intensidad.

especies de brinzales, fustales y latizales es mayor que en áreas que han sido utilizadas para actividades de ganadería o agricultura (Carreón-Santos y Valdez-Hernández 2014). Sin embargo, la composición de las selvas responde a factores climáticos, de suelo y a las

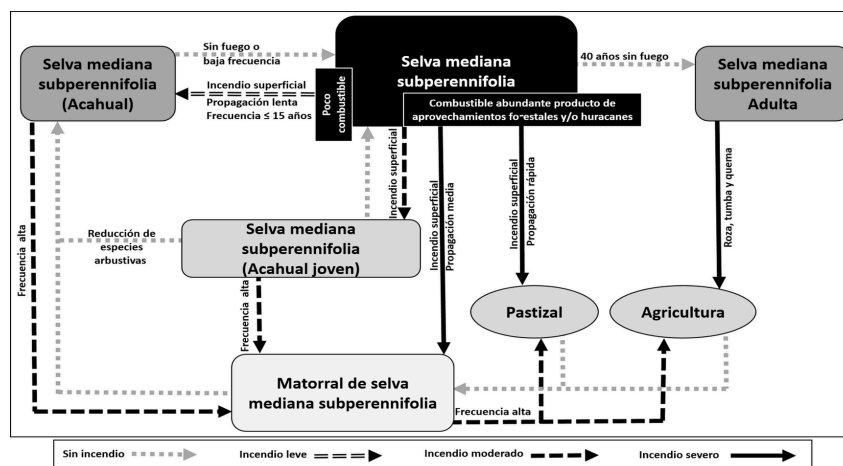


Figura 7. Modelo ecológico que parte de una condición de selva mediana subperennifolia e ilustra los posibles escenarios en relación a la ocurrencia de incendios forestales (Adaptado de Flores *et al.*, 2020) *debido a que al cambio de uso de suelo puede ser propiciado por otras causas, en este modelo se consideran los cambios de uso de suelo a partir de incendios forestales.

Cuadro 3. Características de las condiciones alternativas a las que puede tender un ecosistema de selva mediana subperennifolia (en relación a la ocurrencia de incendios forestales presentada en el modelo ecológico de la figura 7) (Adaptado de Flores *et al.*, 2020).

Características	SMS						
	SMS	SMS Acahual	SMS Acahual joven	Matorral de SMS	SMS Adulta	Pastizal	Agricultura
Condición			Proceso de restauración (Acahual joven)	Matorral espinoso con pastizal. (Acahual joven)	Dominio de pocas especies. Densidad y competencia bajas	Vegetación anual	Vegetación arbustiva
Edad (años)	Selva joven	15 - 20	15 - 20	1 - 5	25 - 50	1	1 - 2
Regeneración	Rebrotos y semillas	Rebrotos y semillas	Rebrotos y semillas	Rebrotos y semillas	Semillas	Semillas y rizomas	Semilla
Densidad regeneración (individuos/ha)	126,000	104,200	650,200	200	204,000	300,000	7,000
Número de familias	Árboreo: 16	Árboreo: 13	Árboreo: 17	Árboreo: 7	Árboreo: 27	Árboreo: 3 Herbáceo: 5	1 o 2
Número de géneros	Árboreo: 24	Árboreo: 19	Árboreo: 23	Árboreo: 12	Árboreo: 43	Árboreo: 5 Herbáceo: 7	1 o 2
Densidad del arbolado (individuos/ha)	2,010	1,900	30,000	200	2,260	25 - 30	---
Diámetro normal (cm)	20	19	10	7	35	---	---
Altura	16 m	13 m	18 m	5 m	18	1 m	1.5 m
Capa de combustibles (cm)	7.75	2.5	2.0	1.5	8.0	3.0	2.5
Cobertura (%)	80	75	75	25	90	45	60
Riesgo de incendio*	Bajo	Medio	Medio	Alto	Bajo	Alto	Bajo

SMS: Selva mediana subperennifolia; SMS Acahual: Acahual de Selva mediana subperennifolia; SMS Acahual joven: Acahual joven de Selva mediana subperennifolia; Matorral de SMS: Matorral de Selva mediana subperennifolia; SMS adulta: Selva mediana subperennifolia adulta. *Riesgo de incendio en base a disponibilidad potencial de combustibles.

En todo ecosistema natural, la respuesta de regeneración y composición de la vegetación ante una perturbación es muy variable, lo que genera diversas etapas sucesionales (Navarro y Granados, 1997). Se ha reportado para selva mediana subperennifolia en Quintana Roo en áreas afectadas por incendios forestales después de 10 años, que la diversidad de

intervenciones humanas (Negreros-Castillo y Martínez, 2011). Así como los modelos pueden cambiar dependiendo de los cambios de la cobertura del suelo y del régimen de los incendios (Millington, 2009), esta es una visión cualitativa, eventualmente se deben hacer valoración de los diferentes elementos de los ecosistemas y de los factores de permutación para contar con modelos

ecológicos cuantitativos con los cuales se pueda hacer estimaciones de los procesos sucesiones de acuerdo a las variaciones de estos elementos (Ocampo-Zuleta y Julio Beltrán-Vargas, 2018). Por esta razón, estos modelos solo se aplican de manera general para el conocimiento de la respuesta de las selvas ante incendios forestales, sin embargo, al realizar un estudio más detallado de una región en particular se podrían enriquecer estos modelos utilizando herramientas de predicción del comportamiento del fuego, modelos de combustibles, modelos de pérdida de suelo (Madrigal *et al.* 2011), variabilidad climática y factores como balance hídrico, entre otros (Ocampo-Zuleta y Julio Beltrán-Vargas, 2018).

Conclusiones

Los modelos ecológicos son una herramienta para esquematizar, de manera general, los posibles escenarios de la respuesta de selva baja subcaducifolia y selva mediana subperennifolia ante la afectación de los incendios forestales. El desarrollo de estos modelos con base a una lógica inductiva-deductiva cíclica permitió integrar y resumir la dinámica de estos ecosistemas. Sin embargo, se requiere contar con personal que tenga experiencia en el tema de incendios forestales (expertos, combatientes), específicamente con relación a la respuesta de los ecosistemas ante la ocurrencia de incendios. De esta forma, los modelos ecológicos ayudan a entender diferentes grados de resiliencia. Sin embargo, es importante mencionar que estos modelos son solo estimaciones cualitativas generales, los cuales se tienen que tomar con un enfoque adaptativo al fuego, e irse modificando, con base a información específica. Con base a esto, eventualmente, se deberá tender a una ponderación cuantitativa de los diferentes factores que caracterizan la dinámica del ecosistema (densidad, estructura y composición), que se deriva después de un incendio. Con base a esto, los diferentes escenarios de un modelo pueden cuantificarse y compararse, a través de parámetros como la diversidad, la dominancia, la similitud, etc. Más aún, la temporalidad definida para cada escenario, permite estimar el tiempo de restauración hacia una condición previa a la perturbación. No obstante, para la cuantificación de los modelos ecológicos se requiere implementar metodologías de evaluación específicas, donde se incluyan sitios permanentes de monitoreo, que permita documentar la dinámica de sucesión de los ecosistemas forestales, específicamente en relación a su respuesta al fuego. Sin embargo, actualmente existe poca información cuantitativa sobre los impactos del fuego

en las regiones tropicales del país, por lo que los modelos ecológicos cualitativos resultantes en este trabajo ofrecen un primer panorama para apoyar en la toma de decisiones sobre la necesidad de establecer actividades de restauración asistida o, en su caso, permitir que el ecosistema se restaure en forma natural.

Agradecimientos

Agradecemos la participación de todo el personal de la Reserva de la Biosfera de Sian Ka'an, en especial a: Felipe Ángel Omar Ortiz Moreno, Oscar Guzmán Escalante, Eulogio Puc Kinil, Eduardo Chaires Montecinos y Daniel Tun Oy, por compartir su conocimiento y experiencia en la ecología de las selvas en relación a los incendios forestales. Así mismo, agradecemos al ejido de Kinchil y al comisariado ejidal Fausto May Pisté, por la aportación de sus conocimientos

Literatura citada

- Blanco, J. A. (2013). Modelos ecológicos: descripción, explicación y predicción. *Ecosistemas*, 22(3), 1-5. <https://doi.org/10.7818/ECOS.2013.22-3.01>
- Casal, M., Prado, S., Reyes, O. y Rivas, M. (2001). *Efectos del fuego sobre la germinación de varias especies leguminosas arbustivas*. En: Congresos Forestales. https://secforestales.org/publicaciones/index.php/congresos_forestales/article/view/15864/15707
- Camargo-Ricalde, S. L. (2000). Descripción, distribución, anatomía, composición química y usos de *Mimosa tenuiflora* (Fabaceae-Mimosoideae) en México. *Revista de Biología Tropical*, 48(4), 939-954. Recuperado de <https://doi.org/10.15517/rbt.v48i4.18985>
- Carreón-Santos, R. J. y Valdez-Hernández, J. I. (2014). Estructura y diversidad arbórea de vegetación secundaria derivada de una selva mediana subperennifolia en Quintana Roo. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 20(1), 119-130. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2013.06.023>
- Cochrane, M. A. (2003). Fire science for rain forests. *Nature*, 421, 913-919. <https://www.nature.com/articles/nature01437>.
- CONANP y TNC. (2009). *Programa de manejo integral del fuego, Reserva de la Biosfera Selva El Ocote Chiapas, México 2009-2012*. Geolatina-México S.C. Ocozacoautla De Espinosa, Chiapas, México.
- Comisión Nacional Forestal. (s.f). <https://snif.cnf.gob.mx/incendios/>
- CONABIO. (s.f.). Sistema de Alerta Temprana de Incendios. <http://incendios.conabio.gob.mx/>
- Corrêa S., M., Bicalho D., F. M. C., Alves da Cruz, W. J., Marimon J., B. H., Schwantes M., B., y Oliveras, I. (2019). Diversity of functional trade-offs enhances survival after fire in Neotropical savanna species. *Journal of Vegetation Science*, 31(1),139-150 <https://doi.org/10.1111/jvs.12823>
- Cochrane, M. A. (2001). Synergistic interactions between habitat fragmentation and fire in tropical forests. *Conservation Biology*, 15(6), 1515-1521. <https://doi.org/10.1046/j.1523-1739.2001.01091.x>
- Dávila N., G. (2006). El razonamiento inductivo y deductivo dentro del proceso investigativo en ciencias experimentales y sociales. *Laurus*, 12, 180-205. <https://www.redalyc.org/pdf/761/76109911.pdf>
- Duno de S., R., Ramírez M., I., Tapia M., J. L., Hernández A., S., Can, L. L., Cetzal-Ix, W., Méndez J., N., Zamora C., P., Gutiérrez B., C. y Fernández C., G. C. (2018). Aspectos generales de la flora vascular de la península de Yucatán México. *Botanical sciences*, 96(3), 515-532. <https://doi.org/10.17129/botsci.1868>
- Estrada M., H., Cobos G., V., Acosta R., J. L., Peña F., S., Castilla M., M., Castillo C., C., Franco B., S., López C., D., López D., M., Luna F., W., Maldonado R., A., Álvarez R., O., Cámara R., J. L., Morales G., A., Moreno A., A. M., Pérez N., B., Rodríguez L., P. y Zapata L., R. L. (2016). Sequía en la península de Yucatán. *Tecnología y Ciencias del Agua*,7(5), 151-165. <https://www.scielo.org.mx/pdf/tca/v7n5/2007-2422-tca-7-05-00151.pdf>
- Feinsinger, P. (2013). Metodologías de investigación en ecología aplicada y básica: ¿cuál estoy siguiendo, y por qué?. *Revista Chilena de Historia Natural*, 86, 385-402. <http://dx.doi.org/10.4067/S0716-078X2013000400002>
- Finol de F., M. y Vera S., J. L. (2020). Paradigmas, enfoques y métodos de investigación: análisis teórico. *Mundo Recursivo*, 3(1), 01-24.
- Flores G., J. S. y Espejel C., M. L. (1994). *Tipos de vegetación de la península de Yucatán*. Universidad Autónoma de Yucatán. Mérida, Yucatán, México. <https://biblioteca.ecosur.mx/cgi-bin/koha/opac-detail.pl?biblionumber=000020360>.
- Flores G., J. G., Flores R., A. G., Rivera L., R. R. y Lomelí Z., M. E. (2020). *Modelos ecológicos de ecosistemas tropicales con relación al impacto de incendios forestales*. Folleto técnico No. 2. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. CIRPAC. C. E. Centro-Altos de Jalisco. Tepatitlán de Morelos, Jalisco, México. https://www.researchgate.net/publication/370124847_modelos_ecologicos_de_ecosistemas_tropicales_con_relacion_al_impacto_de_incendios_forestales.
- Flores G., J. G., Cadena Z., D.A., Flores R., A.G., Rivera L., R.R., Arellano M., F., Ursúa G., F.E., Ortiz M., F.A.O., Guzmán E., O., y Gutiérrez C., D. (2023). *Efecto del fuego en la composición de una selva mediana subperennifolia*. XIII Reunión Nacional de Investigación Forestal. Chihuahua, Chihuahua.
- García C., X., Rodríguez S., B. y Chavelas P., J. (1992). Regeneración natural en sitios afectados por el huracán Gilberto e incendios forestales en Quintana Roo. *Ciencias Forestal en México*, 17(72), 75-99. <https://cienciasforestales.inifap.gob.mx/index.php/forestales/article/view/1066>
- Harrison, S. P., Prentice, I. C., Bloomfield, K. J., Dong, N., Forkel, M., Forrest, M., Ningthoujam, R.K., Pellegrini, A., Shen, Y., Baudena, M., Cardoso, A.W., Huss, J.C., Joshi, J., Oliveras, I., Pausas, J.G. y Simpson, K. J. (2021). Understanding and modelling wildfire regimes: an ecological perspective. *Environmental research*, 16, 125008 <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac39be>

- Jardel P., E., Ramírez V., R., Castillo N., F., García R., S., Balcázar O., E., Chacón M., J. C. y Morfín R., J. (2007). Manejo del fuego y restauración de bosques en la reserva de la biosfera Sierra de Manantlán, México. En: Flores-Garnica, J. G., D. A. Rodríguez-Trejo, O. Estrada-Murrieta y F. Sánchez-Zárraga (Eds.). *Incendios forestales*. (pp. 215-242). CONAFOR-Mundi Prensa. México, D. F., México.
- Madrigal O., J., Hernando, C. y Guijarro G., M. (2011). El papel de la regeneración natural en la restauración tras grandes incendios forestales: el caso del pino negral. *Boletín del CIDEU*, 10, 5-22. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=3868144>.
- Madrigal O., J., Hernando L., C. y Guijarro G., M. (2009). El uso de los sistemas de información geográfica en los modelos de regeneración post-incendio. *Cuadernos de la Sociedad Española de Ciencias Forestales*, 29, 49-57.
- Navarro M., M. A. y Granados S., D. (1997). Dinámica sucesional en un bosque tropical afectado por disturbios en la zona norte de Quintana Roo. *Revista Chapingo. Ciencias Forestales*, 1, 5-16. Recuperado de <https://backup.chapingo-cori.mx/articulosPDF-rchscfa/revista/articulos/rchscfaIII2164.pdf>.
- Neri P., A. C., Rodríguez T., D. A. y Contreras A., R. (2009). Inflamabilidad de combustibles forestales en las selvas de Calakmul, Campeche. *Universidad y Ciencia Trópico Húmedo*, 25(2),121-132. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0186-29792009000200002.
- Negreros-Castillo, P. y Martínez S., I. (2011). Crecimiento y regeneración avanzada de *Lysiloma latisiliquum* (L.) Benth. en una selva de Quintana Roo. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 2(5),15-28 https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-11322011000300003.
- Ocampo-Zuleta, K. (2019). Modelo descriptivo de restauración ecológica en zonas afectadas por incendios forestales e invasión de retamo espinoso en los cerros orientales de Bogotá. *Acta biológica colombiana*, 24(1),1-12. <http://dx.doi.org/10.15446/abc.v24n1.71953>
- Parra-Lara, Á. del C., Bernal-Toro, F. H. (2010). Incendios de cobertura vegetal y biodiversidad: una mirada a los impactos y efectos ecológicos potenciales sobre la diversidad vegetal. *El Hombre y la Máquina*, 35, 67-81. <https://www.redalyc.org/pdf/478/47817140008.pdf>
- Pausas J. G. (2015). Bark thickness and fire regime Functional. *Ecology*, 29, 315–327 <https://doi.org/10.1111/1365-2435.12372>
- Pompa G., M., Vázquez V., L., Zapata M., M. y Solís M., R. (2012). Modelo conceptual del potencial de incendios forestales en Durango: avances preliminares. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 3(13), 95-106. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v3i13.492>
- Rodríguez T., D. A., Martínez M., P. y Martínez L., P. J. (2019). Efectos del fuego en el arbolado de un bosque tropical de pino y en el de una selva baja caducifolia en Villaflores, Chiapas. *Ciencia Forestal*, 29(3),1033-1047. <https://doi.org/10.5902/1980509833952>
- Rodríguez-Trejo, D.A., Tchikoué, H., Cíntera-González, C., Contreras-Aguado, R., y de la Rosa-Vázquez, A. (2011). Modelaje del Peligro de Incendio Forestal en las Zonas Afectadas por el Huracán Dean. *Agrociencia*, 45(5), 593-608.
- Rodríguez-Trejo, D. A. (2014). *Incendios de vegetación. Su ecología, manejo e historia*. Colegio de Postgraduados. México.
- Rodríguez-Trejo, D. A., Muñoz, P. M. y Martínez L., P. J. (2019). Efectos del fuego en el arbolado de un bosque tropical de pino y en el de una selva baja caducifolia en Villaflores, Chiapas. *Ciencia Florestal*, 29(3), 1033-1047. <https://doi.org/10.5902/1980509833952>
- Rodríguez-Trejo, D. A., Martínez-Muñoz, P., Pulido-Luna, J. A., Martínez-Lara, P. J., y Cruz-López, J. D. (2020). Combustibles, comportamiento del fuego y emisiones en un pastizal y una sabana artificiales en Chiapas, México. *Revista de Biología Tropical*, 68(2), 641-654. <http://orcid.org/0000-0002-1407-8365>
- Rocha, L. A. G., Ramírez, M. N. y González, E. M. (2010). Riqueza y diversidad de árboles del bosque tropical caducifolio en la Depresión Central de Chiapas. *Boletín de la Sociedad Botánica de México*, 87, 89-103.
- Shlisky, A., Waugh, J., González, P., González, M., Manta, M., Santoso, H., Alvarado, E., Ainuddin Nuruddin, A., Rodríguez-Trejo, D.A., Swaty, R., Schmidt, D., Kaufmann, M., Myers, R., Alencar, A., Kearns, F., Johnson, D., Smith, J., Zollner, D. y Fulks, W. (2007). El fuego, los ecosistemas y la gente: amenazas y estrategias para la conservación global de la biodiversidad. Arlington: The Nature Conservancy, 20 p. (Informe Técnico Iniciativa Global para el Manejo del Fuego, 2007-02).

- Simpson, K. J., Olofsson, J. K., Ripley, B. S. y Osborne, C. P. (2019). Frequent fires prime plant developmental responses to burning. *Proceedings of the Royal Society*. <https://doi.org/10.1098/rspb.2019.1315>
- Tricone, F. y Anderson, T.R. (2020). *El monitoreo y la evaluación de los efectos del fuego: manual del estudiante*. Sarteneja. Belize.
- Withey, K., Berenguer, E., Ferraz P., A., Espiritu-Santo, F. D.B., Lennox, G. D., Silva, C. V. J., Aragão, L. E. O. C., Ferreira, J., França, F., Malhi, Y., Chesini R., L. y Barlow, J. (2018). Quantifying immediate carbon emissions from El Niño-mediated wildfires in humid tropical forests. *Philosophical transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological sciences*, 373(1760), 20170312. <https://doi.org/10.1098/rstb.2017.0312>