



DOI: <https://doi.org/10.29298/rmcf.v12iEspecial-1.1020>

Artículo de revisión

Investigaciones del INIFAP en manejo forestal y servicios ambientales de bosques templados mexicanos: evolución, logros y perspectivas

Research by INIFAP on forest management and environmental services in Mexican temperate forests: evolution, achievements and perspectives

Vidal Guerra-De la Cruz^{1*}, Enrique Buendía-Rodríguez², Julián Cerano-Paredes³, Fabián Islas-Gutiérrez², José Carlos Monárrez González⁴, Eulogio-Flores Ayala², Tomas Pineda-Ojeda² y Miguel Acosta-Mireles²

Abstract

Timber production has been historically the most relevant economic activity in the Mexican forestry sector, although governmental research on this matter started well after the creation of the *Instituto Nacional de Investigaciones Forestales* (National Institute of Forest Research). Recently, the generation of environmental services has emerged as a new field in forestry research. The aim of this study was to analyze the contribution of the *Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias* (INIFAP) (National Institute of Forestry, Agriculture and Livestock Research) (INIFAP) to the scientific investigation on forest management and environmental services of temperate forests during the last 35 years. An exhaustive review of forest scientific publications in peer-reviewed national and international journals, in which INIFAP researchers had a relevant participation was conducted. The results were analyzed in three defined periods of institutional development and according with the structure of INIFAP's research programs, where Forest Management includes Biometrics, Silviculture and Fire regimes; while Environmental Services include Carbon Capture, Water and paleoclimatic studies. An increase in publications on the two topics is observed during the most recent period, attributable to a greater availability of financing for forest research and the current importance of forests in mitigating climate change. Scientific production was concentrated in national journals, with the institutional journal standing out. Biometrics and Forestry are areas of strength of the institute and confirm its pioneering role in this type of studies in Mexico. Paleoclimatic studies show accelerated growth in the third period; in carbon capture and hydric recharge, growth is moderate.

Key words: Carbon, biometrics, paleoclimate, fires regimes, environmental services, forestry.

Resumen

El aprovechamiento maderable ha sido, históricamente, la actividad económica más relevante en el sector forestal mexicano; aunque la investigación gubernamental en el tema inició después de la creación del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales. Recientemente, la generación de servicios ambientales ha surgido como un nuevo campo de investigación. El objetivo fue analizar las aportaciones del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) en la investigación científica sobre Manejo y Servicios Ambientales de bosques templados durante los últimos 35 años. Se realizó una revisión exhaustiva de publicaciones científicas nacionales e internacionales arbitradas, en las que investigadores del INIFAP tuvieron una participación relevante. Los resultados se analizaron en tres períodos definidos de desarrollo institucional y en concordancia con la estructura de los sistemas de investigación del INIFAP; en los cuales el Manejo Forestal incluye Biometría, Silvicultura y regímenes de Incendios; y en los Servicios Ambientales se integran: Captura de Carbono, Agua y estudios paleoclimáticos. Se observa un incremento de publicaciones en los dos temas durante el periodo más reciente, atribuible a una mayor disponibilidad de financiamiento a la investigación forestal y a la importancia actual de los bosques en la mitigación del cambio climático. La producción científica se concentró en revistas nacionales, sobresaliendo la revista institucional. La Biometría y Silvicultura son áreas de fortaleza del instituto y corroboran su papel pionero en este tipo de estudios en México; los paleoclimáticos presentan un crecimiento acelerado en el tercer período; en captura de carbono y recarga hídrica el crecimiento es moderado.

Palabras clave: Carbono, biometría, paleoclima, regímenes de incendios, servicios ambientales, silvicultura.

Fecha de recepción/Reception date: 28 de diciembre de 2020

Fecha de Aceptación/Acceptance date: 19 de abril de 2021

¹Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, Campo Experimental Valle de México-Sitio Experimental Tlaxcala. México.

²Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Campo Experimental Valle de México. México.

³Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, Centro de Investigación Disciplinaria en Relación Agua, Suelo, Planta, Atmósfera. México.

⁴Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, Campo Experimental Valle de Guadiana. México.

*Autor para correspondencia; correo-e: guerra.vidal@inifap.gob.mx

Introducción

La investigación forestal en el sector gubernamental de México tiene una historia relativamente corta, si considera que el Instituto Nacional de Investigaciones Forestales (INIF) fue creado en 1958. En este contexto, la investigación en manejo forestal se inició con en el Departamento de Manejo de Bosques, cuya estructura se organizó para atender diferentes aspectos del tema citado (Manzanilla, 1985). Por sus antecedentes y misión, el Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) se ha enfocado en la generación de conocimientos y transferencia de tecnologías para mejorar el manejo forestal en México (INIFAP, 2018).

En la actualidad, los ecosistemas forestales han cobrado importancia ante fenómenos globales como el cambio climático, además de la incorporación de nuevas visiones del bosque como la de proveer servicios ecosistémicos a la sociedad por medio de un manejo forestal sustentable (Aguirre-Calderón, 2015). Los servicios ecosistémicos o ambientales se definen como "aquellos beneficios que la población obtiene de los ecosistemas" (MEA, 2005). Se han identificado para los bosques templados de México servicios de provisión, regulación, servicios culturales y de apoyo al hábitat (Galicia y Zarco, 2014).

Tradicionalmente, el manejo forestal se define como la gestión de áreas forestales naturales para la producción maderable. En este sentido, requiere la aplicación de conocimientos de ecología, silvicultura, biometría, y comprende actividades encaminadas al aprovechamiento, conservación y fomento de los recursos forestales de manera ordenada, para satisfacer las necesidades de la sociedad actual y futura (Aguirre-Calderón, 2015). En los bosques templados se ha privilegiado el aprovechamiento forestal maderable sobre los servicios ecosistémicos, influencia que se observa en el desarrollo de la investigación forestal en México.

Por otro lado, existe la necesidad de lograr un mayor desarrollo científico y tecnológico que aumente la competitividad del sector forestal en el contexto de políticas como la apertura comercial en América del Norte (Álvarez-López *et al.*, 2015). En algunos estudios se analiza el desarrollo del manejo forestal (Mendoza y del Ángel, 1999;

Torres-Rojo *et al.*, 2016) y los servicios ambientales (Torres y Guevara, 2002) en el país. También, se ha insistido en la importancia de la investigación para procurar un manejo forestal con bases científicas ante los nuevos escenarios nacionales e internacionales (Von Gadow *et al.*, 2004; Aguirre-Calderón, 2015). Por lo anterior, es claro que la investigación científica en esos temas seguirá enfrentando retos importantes en el futuro.

Ante la compleja dinámica descrita, resulta necesario analizar el papel histórico de la investigación realizada en el INIFAP, por medio de las aportaciones científicas en el manejo forestal y los servicios ambientales, su magnitud y naturaleza, porque hasta ahora no se tiene una estimación de ellas en ambas disciplinas. Esta información es crucial para entender el impacto de la investigación, además de retroalimentar a las instancias gubernamentales encargadas de promover la actividad productiva en el ámbito forestal.

El trabajo que aquí se presenta consiste en una revisión de las aportaciones científicas del INIFAP durante las últimas décadas; para ello, se consideró como referencia la estructura de los sistemas de investigación del Instituto en dichos temas, y se ubicaron en el contexto histórico del desarrollo institucional desde su creación. Así, el objetivo planteado fue analizar las aportaciones del INIFAP durante sus primeros 35 años en la investigación científica sobre manejo forestal y servicios ambientales de bosques templados.

Contexto político y económico del sector forestal

La investigación forestal en el INIFAP está determinada por el contexto político del país y por la organización de la Administración Pública Federal. Desde su creación en 1985 como Órgano Administrativo Desconcentrado, el Instituto se constituyó como un Organismo Público Descentralizado, y en 2003 se convirtió en Centro Público de Investigación (Urbina, 2017).

En la presente revisión, se distinguen tres periodos de desarrollo de la investigación forestal institucional: el primero comprende de 1985 al 2000, el segundo de 2001 al 2010, y el tercero de 2011 a 2020. En los años 80, el sector forestal estuvo

administrado por la Secretaría de Agricultura y Ganadería (SAG) con una política forestal que promovía los aprovechamientos maderables y la participación de los propietarios en la producción forestal (Caballero, 2017). Con la creación del INIFAP, la investigación forestal se integró a la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (SARH), lo que significó un financiamiento limitado que se reflejó en la disminución del número de investigadores y Campos Experimentales Forestales.

En la última década del siglo XX, el sector forestal se transfirió a la Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca. En ese lapso se fortaleció la idea de conservar y mejorar el medio ambiente, en concordancia con nuevos marcos legales. El ajuste influyó en el manejo forestal, ya que se impusieron medidas para proteger a la fauna silvestre y otros recursos, con el propósito de reducir el impacto de los aprovechamientos (Caballero, 2017). Además, el esquema de financiamiento de proyectos en el INIFAP cambió de un presupuesto asignado, a la creación de un fondo público-privado para atender más, efectivamente, los problemas de los productores agrícolas, no necesariamente forestales.

El segundo periodo (2001-2010) coincide con la fundación de la Comisión Nacional Forestal (Conafor) en el año 2001, y significó un gran impulso al sector tanto en lo operativo, como en la investigación. En el año 2002, se instituyó el Fondo Sectorial para la Investigación Forestal que impulsó fuertemente la investigación, no solo del INIFAP, a nivel nacional.

En el tercer periodo (2010-2020), la tendencia hacia un manejo forestal sustentable e incluyente se acentuó por diversos factores sociales e institucionales; entre ellos, por el reconocimiento del papel de los bosques en la mitigación del cambio climático. En consecuencia, la investigación forestal en el INIFAP se ha diversificado con temas de servicios ambientales, efectos del clima y eventos de disturbio en los bosques, sin descuidar aspectos tradicionales como la producción maderable. El financiamiento de la investigación forestal del Instituto también se ha favorecido con la participación de otras fuentes, además de los recursos autorizados a la institución.

Revisión bibliográfica

Se hizo una revisión exhaustiva de publicaciones científicas nacionales e internacionales con arbitraje y autoría de investigadores del INIFAP de documentos en línea, en primera instancia, y en algunos casos, también de material impreso. Las principales ediciones periódicas mexicanas en el sector forestal son Agrociencia (<https://agrociencia-colpos.mx/index.php/agrociencia/about>), Madera y Bosques (<http://myb.ojs.inecol.mx/index.php/myb>), Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente (<https://revistas.chapingo.mx/forestales/?section=articles&subsec=issues>) y la Revista Mexicana de Ciencias Forestales (antes Ciencia Forestal en México) (<https://cienciasforestales.inifap.gob.mx/>). La búsqueda de información comprendió el período de enero de 1985 a julio de 2020. Otras revistas nacionales fueron consideradas cuando el tema y nivel de participación institucional en los artículos fue relevante.

Para las revistas de origen internacional, la búsqueda se realizó a través de la plataforma del Conicyt en los sitios *Web of Science*, *Scopus*, *Science Direct*, *SpringerLink*, *SciELO*, *Redalyc* y *Dialnet*; como filtro inicial, se aplicó la afiliación institucional de los autores, después los temas de manejo forestal y servicios ambientales.

En todos los casos, los criterios para incorporar las contribuciones fueron: a) los autores principales (primero, segundo o de correspondencia) fueran investigadores activos, retirados o becarios del INIFAP, y b) el contenido de la contribución incluyera temas considerados en el INIFAP relacionados con el Manejo Forestal y Servicios Ambientales de bosques templados. Es decir, el manejo forestal comprende los temas que brindan soporte técnico-científico a diferentes aspectos: silvicultura, gestión de la producción maderable, regímenes de incendios y biometría. En el caso de los servicios ambientales, se consideraron estudios relacionados con cuantificación de carbono, interceptación de lluvia y variabilidad histórica del clima. Por su relevancia en los componentes geográficos de las dos áreas científicas, se integraron estudios en Geomática, referentes al procesamiento digital de imágenes de satélite y los Sistemas de Información Geográfica.

Dadas las limitaciones de espacio, en este documento se hace mención, únicamente, a una muestra representativa de cada tema. En el análisis de la información, se destacaron los periodos de desarrollo institucional ya indicados, así como el tipo de revistas en las que las contribuciones fueron publicadas. El análisis y las gráficas de los resultados se hizo con el *software SigmaPlot® Versión 10: Exact Graphs for Exact Science*.

Resultados sobre el desarrollo y logros de investigación

Silvicultura y Biometría

Los estudios realizados en el INIFAP son escasos, pero muy importantes; destacan los sistemas basados en modelos de regeneración y mortalidad en bosques de *Pinus arizonica* Engelm., en Chihuahua (Islas y Mendoza, 1989) enfocados a la restauración; y los modelos de crecimiento de *P. montezumae* Lamb., en Puebla (Zepeda y Acosta, 2000) con un enfoque de producción. Estos trabajos, esenciales para la toma de decisiones, son notables desde el primer periodo con temas de dispersión de semillas de *P. montezumae* (Acosta y Musalem, 1986); regeneración de *P. arizonica* (Chacón y Sánchez, 1986); *Abies religiosa* (HBK) Schltdl. et Cham. (Nieto *et al.*, 2003) y de otras coníferas (Pérez *et al.*, 2007). Las investigaciones de manejo forestal y silvicultura fueron más comunes en los dos primeros periodos (1985-2000 y 2001-2010) y menos en el tercero (Figura 1); aunque con más diversificación, ya que incluyen investigaciones de conservación de hongos (Zamora *et al.*, 2018) y de la fauna silvestres (Chávez-León, 2019) en áreas bajo manejo forestal. La aportación del INIFAP en esos temas se refleja más en revistas nacionales, principalmente, en la revista institucional (Figura 2B).



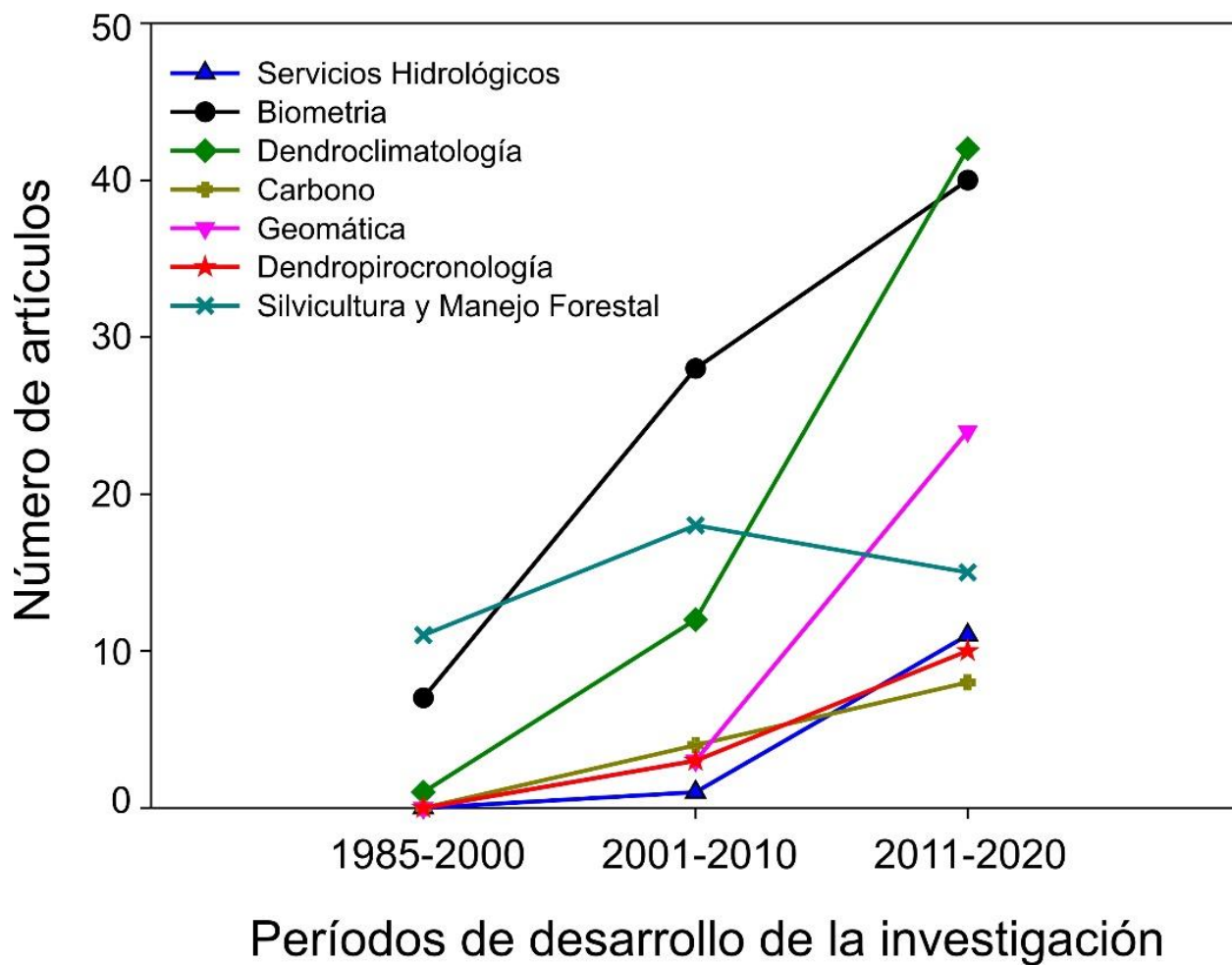


Figura 1. Tendencia de la producción científica del INIFAP por temas de investigación relacionadas con Manejo Forestal y Servicios Ambientales durante tres etapas de desarrollo.



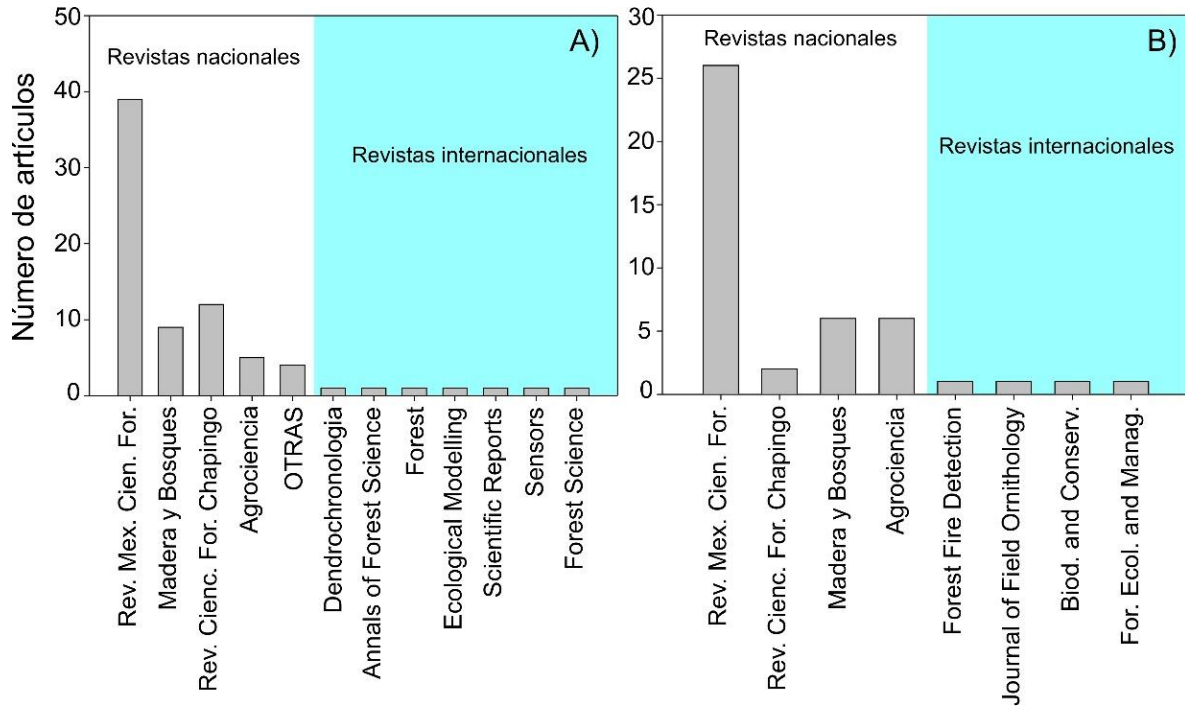


Figura 2. Trabajos de investigación sobre biometría (A) y manejo forestal y silvicultura (B) desarrollados por investigadores del INIFAP.

Una tendencia diferente se observa para los estudios de biometría, que son de gran relevancia para el desarrollo de una silvicultura más cuantitativa en México. Durante los tres periodos, se advierte una notable contribución institucional (Figura 1) en temas de modelación estadística del crecimiento, rendimiento e índices de sitio.

Cabe destacar que el INIFAP ha sido, en el país, una institución pionera en estudios forestales cuantitativos de largo plazo, resultado del desarrollo de una metodología e implementación de una red nacional de Sitios Permanentes de Investigación Silvícola (SPIS) (Manzanilla, 1985); los cuales fueron la base para los primeros ensayos de modelación del crecimiento de coníferas de importancia comercial en México. Al respecto, Mas y Pahuá (1989) presentaron los resultados de más de dos décadas de mediciones en Michoacán; Martínez *et al.* (2019) hicieron una revisión histórica de la aportación institucional en el rubro de monitoreo forestal en los SPIS ubicados en el

norte de México. Esta iniciativa constituye el antecedente más claro de una estrategia formal de monitoreo de largo plazo de los bosques templados mexicanos bajo manejo. Derivado de lo anterior, el INIFAP también fue pionero en los estudios de calidad de sitio para *P. montezumae* (Rodríguez *et al.*, 1988), índices de competencia en *P. cooperi* C. E. Blanco (Valles-Gandara *et al.*, 1998) y en la predicción del crecimiento y rendimiento tanto de *P. montezumae* (Zepeda y Acosta, 2000), como de *P. rudis* Endl. (Magaña *et al.*, 2008).

Otro aspecto relevante es el manejo del potencial productivo de los bosques por medio de diagramas de densidad. Este tipo de estudios en el INIFAP son más notables en el tercer periodo, con aportaciones metodológicas importantes (Quiñonez-Barraza *et al.*, 2018; Quiñonez-Barraza y Ramírez-Maldonado, 2018; Tamarit-Urias *et al.*, 2020). También, se han abordado los modelos de estimación del volumen maderable por sistemas compatibles de ahusamiento para varias especies del norte de México (Quiñonez-Barraza *et al.*, 2014). Al respecto, se han publicado varios trabajos en revistas internacionales; sin embargo, predominan las publicaciones en revistas nacionales (Figura 2A).

Regímenes de incendios

Uno de los factores ecológicos de gran relevancia en el manejo de los bosques templados son los incendios, cuya frecuencia e intensidad influyen en su dinámica (Rodríguez-Trejo y Fulé, 2003). Se ha observado que el manejo forestal modifica los regímenes de incendios debido a los cambios en la estructura y composición de las masas forestales que conllevan las actividades propias del manejo forestal (Cerano-Paredes *et al.*, 2016). Los estudios dendropirocronológicos permiten establecer su frecuencia, extensión, intensidad, año y época en que ocurrieron (Cerano-Paredes *et al.*, 2015). Dicha información es crucial para la prescripción de quemadas controladas y la reincorporación de la función del fuego en áreas bajo manejo.

Sin embargo, el escaso conocimiento de los regímenes de incendios de los bosques ha limitado su utilización como herramienta silvícola. En la última década, en el INIFAP se ha generado una red de estudios sobre el tema, con lo que se determinó el papel de las variaciones meteorológicas en su frecuencia histórica. Los registros alcanzan al menos un siglo para algunas regiones (Cerano-Paredes *et al.*, 2015, 2016) y para otras, cerca de los 600 años (Cerano-Paredes *et al.*, 2021). La red comprende investigaciones en México y algunas localidades de Guatemala, con la colaboración de instituciones nacionales e internacionales; y los resultados se han publicado, principalmente, en revistas internacionales (Figura 3). Destaca que las publicaciones mantienen una tendencia creciente desde sus inicios (Figura 1); de ellas, las más representativas son las de Molina-Pérez *et al.* (2016) y Cerano-Paredes *et al.* (2019) en el norte de México; y Cerano-Paredes *et al.* (2015; 2016) en el centro del país.



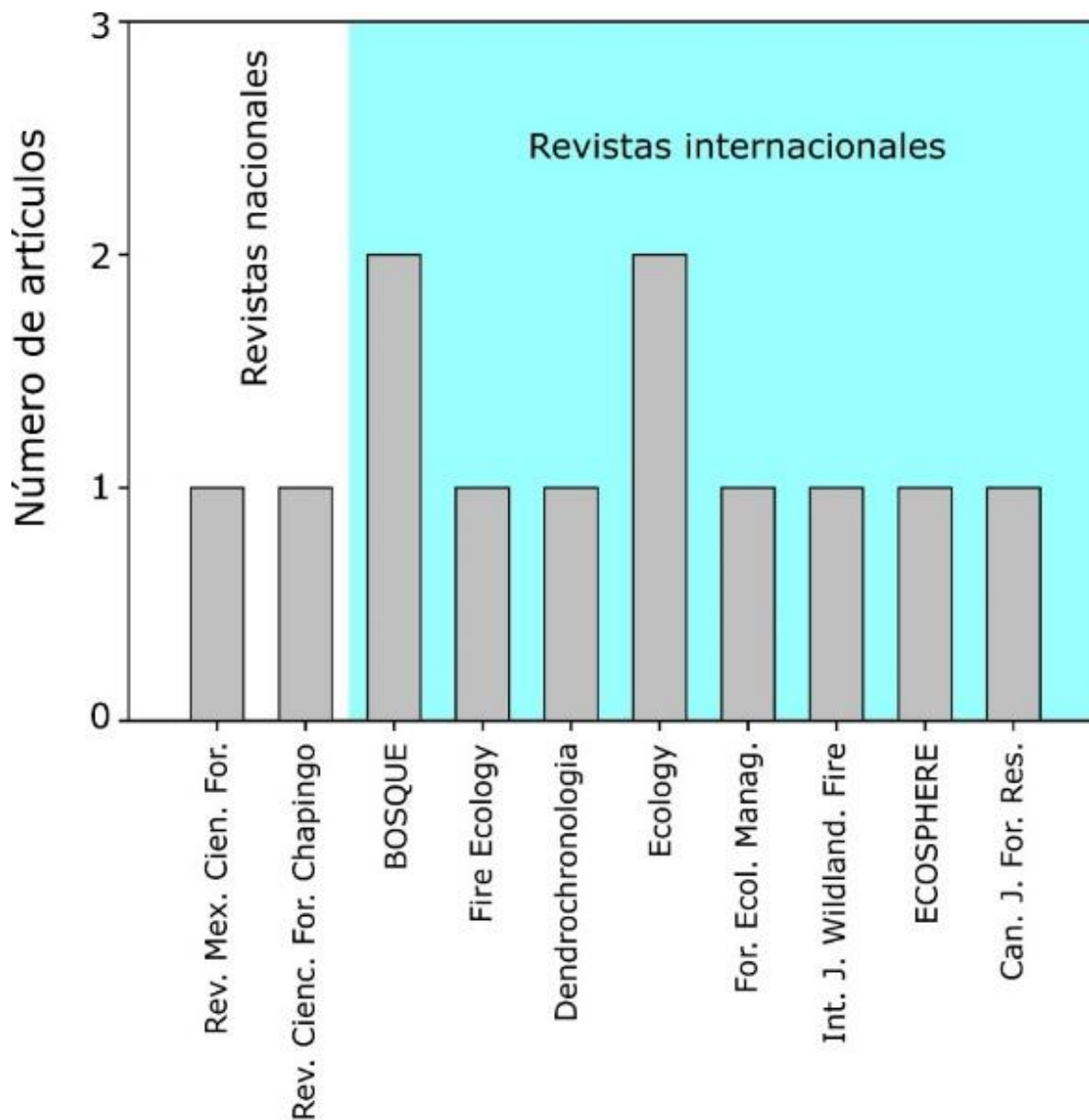


Figura 3. Artículos sobre la reconstrucción de regímenes de incendios desarrollados por investigadores del INIFAP en colaboración con investigadores nacionales e internacionales.

Estas investigaciones han contribuido al conocimiento de: 1) la relación entre la variabilidad climática y la frecuencia histórica de incendios; 2) la influencia de los fenómenos de circulación general (El Niño Oscilación del Sur y la Oscilación Decadal del Pacífico) en la modulación de incendios extensos y severos para diferentes

regiones del país; y 3) los cambios en la frecuencia del fuego en décadas recientes, atribuido al manejo y la supresión. Conocimientos que son relevantes en el contexto actual y futuro del manejo forestal, ya que es una actividad de largo plazo.

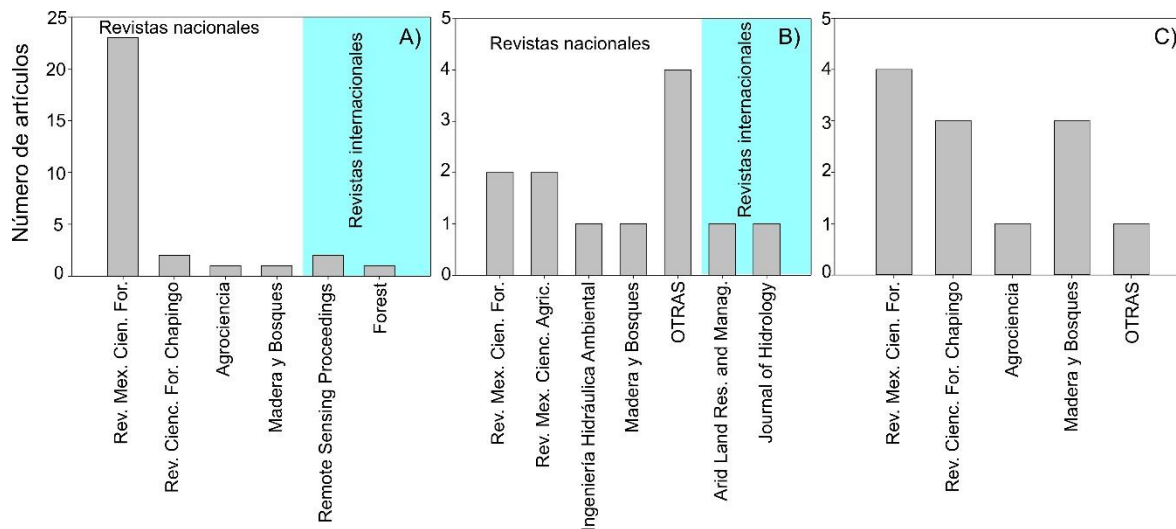
Estimaciones de Carbono

Ante los escenarios de cambio climático, la captura y el almacenamiento de carbono en los ecosistemas forestales son aspectos importantes en los programas de provisión de servicios ambientales. Los estudios que marcaron el inicio de esta línea de investigación en el INIFAP surgieron en el segundo periodo, con la generación de ecuaciones alométricas para determinar el contenido de biomasa y carbono en diferentes especies forestales (Acosta *et al.*, 2002).

En el periodo actual (del 2011 al 2020), los estudios incluyeron la medición integral del carbono en otros componentes del ecosistema, como el sotobosque (Acosta *et al.*, 2020) y brinzales (Martínez *et al.*, 2020). Anteriormente, solo se consideraba la medición de carbono en la parte aérea de los árboles a través de modelos alométricos, principalmente de especies de clima templado frío (Acosta *et al.*, 2002; Díaz-Franco *et al.*, 2007; Avendaño *et al.*, 2009; Carrillo *et al.*, 2014). En el periodo más reciente, las investigaciones de este tipo en el INIFAP han evolucionado con un ritmo moderado (Figura 1) hacia una mayor diversificación en enfoques y componentes de los ecosistemas. Cabe señalar que los estudios se han publicado únicamente en revistas nacionales (Figura 4C).



Figura 4. Trabajos de investigación sobre Geomática (A), servicios hidrológicos (B) y carbono (C)



generados

por investigadores del INIFAP y publicados en revistas nacionales e internacionales.

Recarga hídrica

La recarga hídrica es otro de los servicios ambientales que tiene cada vez mayor relevancia en los bosques, ya que la cobertura forestal participa de manera importante en el balance hídrico, en los procesos de intercepción de la lluvia, su infiltración, evaporación y transpiración. Si bien, esos temas han sido reconocidos en el ámbito forestal, la línea de investigación surgió recientemente en el INIFAP, a partir del segundo periodo analizado (Flores *et al.*, 2016) y mantiene una tendencia creciente (Figura 1). La mayoría de las publicaciones pertenecen a revistas cuya temática no solo es forestal (Figura 4B), lo que puede atribuirse a que estos procesos tienen causas y efectos que no se limitan a los bosques, aunque participan en su regulación y provisión.

En ese sentido, en INIFAP se han realizado proyectos de infiltración, su efecto en la recarga de acuíferos y la disponibilidad de agua para las plantas (López *et al.*, 2016). Asimismo, se ha generado información sobre escorrentía superficial y su

relación con la intensidad y volúmenes de precipitación por tipos de cubierta vegetal (Serna y Echavarría, 2002).

Otro aspecto de interés es la intercepción de lluvia para identificar el papel de la cobertura arbórea en el balance hidrológico. Se ha estimado la intercepción en función de la lluvia total en bosques de pino, encino y oyamel (Flores *et al.*, 2016). Muñoz-Villers *et al.* (2012) evaluaron procesos como la transpiración, evaporación, intercepción de lluvia y niebla.

Estudios paleoclimáticos

Entre los servicios ambientales derivados de los bosques, la regulación del clima es quizás el menos evidente desde el punto de vista documental en México. Aunque algunos estudios realizados en el INIFAP han mostrado los efectos de la cubierta forestal sobre las variaciones del microclima (González *et al.*, 2015); la comprensión de los procesos climatológicos a escalas mayores de tiempo y espacio es aún limitado. El calentamiento global impactará el desarrollo y el manejo de los bosques; por ello, el conocimiento de la variabilidad histórica del clima es clave para entender los servicios de regulación climática por los bosques.

En el Laboratorio Nacional de Dendrocronología del INIFAP durante los dos últimos periodos de esta revisión, se han desarrollado estudios que han permitido reconstruir la variabilidad de la lluvia por varios siglos (Villanueva *et al.*, 2007a; Cerano *et al.*, 2009, Cerano, 2011a; Stahle *et al.*, 2011; Cerano *et al.*, 2014; Villanueva *et al.*, 2015). Algunos de esas investigaciones comprenden escalas geográficas amplias, y se basan en especies como *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco (Villanueva *et al.*, 2011), *Taxodium mucronatum* Ten. (Villanueva *et al.*, 2007b; Stahle *et al.*, 2012) y *Pinus hartwegii* Lindl. (Villanueva *et al.*, 2015).

A partir de los estudios paleoclimáticos se ha reconstruido la ocurrencia de sequías severas durante el último milenio y se ha analizado su impacto en el centro del país (Stahle *et al.*, 2011). Gran parte de dichos estudios sustentan el "Atlas de Sequía para México", que

comprende el período de 1400 a 2015 (Stahle *et al.*, 2016). Asimismo, se ha determinado la influencia de fenómenos climáticos de circulación general en la variabilidad de la lluvia en el norte (Cerano *et al.*, 2011b; Villanueva *et al.*, 2011) y centro del país (Cerano *et al.*, 2013).

La mayor parte de las publicaciones sobre el particular corresponden a revistas nacionales; no obstante, hay varios títulos en revistas extranjeras (Figura 5); y un crecimiento más acelerado que en cualquier otro tema incluido en la presente revisión (Figura 1).

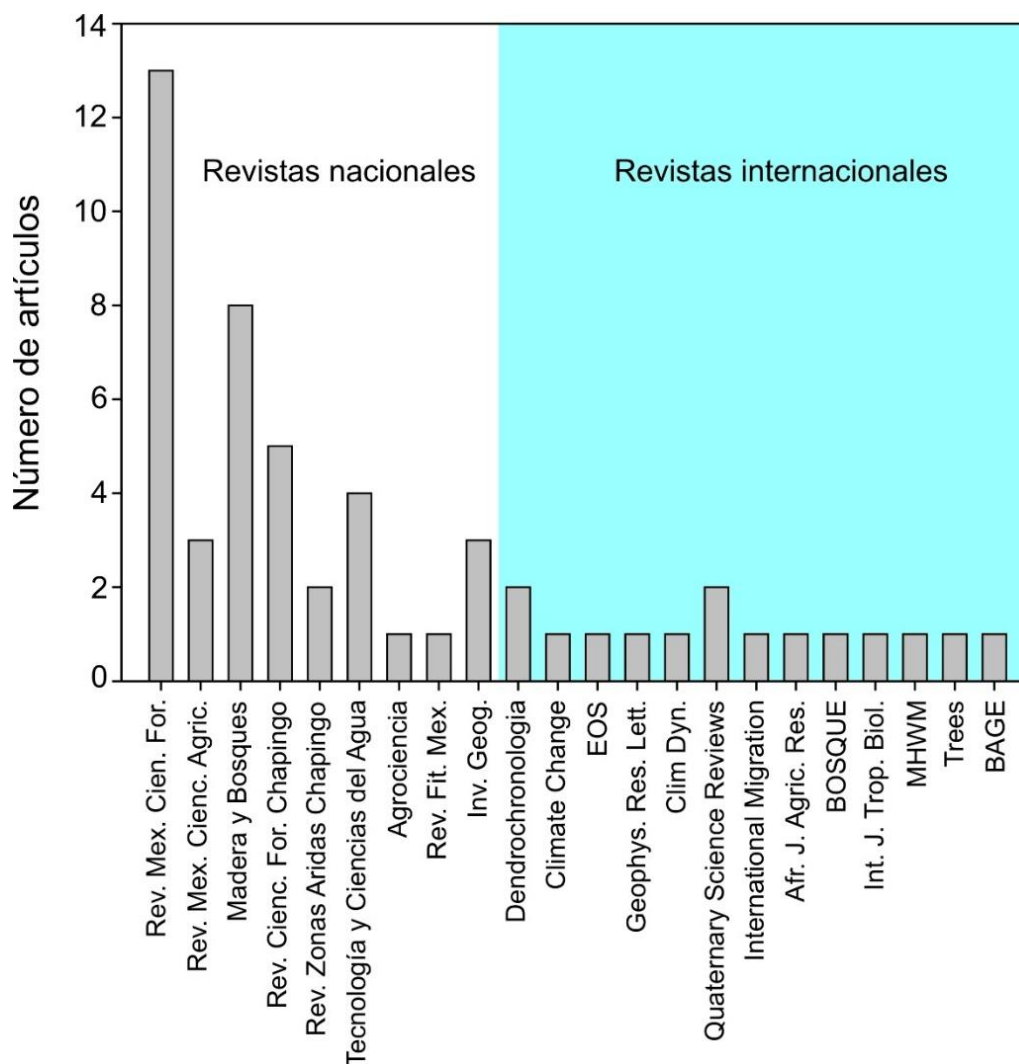


Figura 5. Trabajos de investigación en el área de Dendroclimatología desarrollados por investigadores del INIFAP en colaboración con investigadores nacionales e internacionales.

De los diferentes temas analizados, la Silvicultura muestra una ligera disminución en el tercer periodo. En contraste, la Biometría y Dendroclimatología mantienen una producción creciente en los dos últimos. En la evolución del INIFAP, los temas emergentes como los servicios ambientales tienen mayor desarrollo a partir del segundo periodo analizado. En general, los cambios institucionales en las últimas tres décadas, así como la disponibilidad del financiamiento han influido en el aumento reciente de la producción científica en los dos temas antes señalados (Figura 1).

Conclusiones y Perspectivas

Aunque la cobertura de investigación en Manejo Forestal y Servicios Ambientales en el INIFAP es considerable; el dinamismo del sector, los cambios tecnológicos y el contexto nacional implican retos importantes para la investigación institucional en ambas áreas científicas.

En los rubros de Manejo Forestal y Silvicultura es necesario continuar con la investigación sobre las interacciones de ambos, a fin de generar bases sólidas para la toma de decisiones (Monárrez-González *et al.*, 2018). Se requiere el desarrollo de modelos que permitan analizar alternativas de manejo multipropósito, especialmente, en regiones donde la producción maderable es un objetivo preponderante. Se debe fomentar la obtención de conocimientos sobre sistemas silvícolas que favorezcan la provisión simultánea de servicios ambientales en el contexto de la producción maderable; enfoque indispensable ante los escenarios de incertidumbre asociados al cambio climático.

En los Servicios Ambientales como captura de carbono, la tendencia es hacia el desarrollo de modelos geoespaciales que cuantifiquen cambios en los almacenes de carbono derivados de prácticas de manejo de la vegetación a escalas geográficas mayores. En los servicios hidrológicos, una tarea importante será continuar las investigaciones en el ámbito hidrológico-forestal para contribuir en la toma de decisiones silvícolas, en el contexto de los esquemas actuales de pago por servicios ambientales. Respecto a la dendrocronología, existe una gran oportunidad para llevar

a cabo nuevas líneas de investigación con aplicaciones en el manejo de bosques y cuencas. Los estudios históricos del fuego, en particular, deberán orientar esfuerzos para sustentar la incorporación de los regímenes de incendios como herramientas silvícolas. En estas perspectivas es muy probable que la investigación forestal en el INIFAP siga adaptándose a los cambios futuros, lo cual garantizará que el Instituto siga generando conocimientos y tecnologías en estos dos temas importantes para el progreso del sector forestal en México.

Agradecimientos

Los autores expresan su agradecimiento a los investigadores de las áreas de Manejo Forestal y Servicios Ambientales que han contribuido con sus trabajos al desarrollo y crecimiento del área forestal en el INIFAP.

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener conflicto de intereses.

Contribución por autor

Vidal Guerra de la Cruz: diseño, estructura y redacción del artículo; Enrique Buendía Rodríguez: estructura y redacción del artículo; Julián Cerano Paredes: procesamiento de la información y redacción del artículo; Fabián Islas Gutiérrez: estructura y redacción del artículo; José Carlos Monárrez González: revisión de literatura y redacción del artículo; Eulogio Flores Ayala: revisión de literatura y redacción del artículo; Tomas Pineda Ojeda: revisión de literatura y redacción del artículo; Miguel Acosta Mireles: revisión del artículo.



Referencias

Acosta M., M. y M. A. Musálem. 1986. Dispersión de semillas de *Pinus montezumae* Lamb., en dos matarrasas del Campo Experimental Forestal San Juan Tetla, Puebla. Revista Chapingo 52:35-40.

Acosta M., M., J. Vargas H., A. Velásquez M. y J. D. Etchevers B. 2002. Estimación de la biomasa aérea mediante el uso de relaciones alométricas en seis especies arbóreas en Oaxaca, México. Agrociencia 36(6):725-736.
<https://www.colpos.mx/agrocien/Bimestral/2002/nov-dic/art-10.pdf> (2 de septiembre de 2020).

Acosta M., M., F. Carrillo A., E. Buendía R., J. de D. Benavides S., E. Flores A. y L. González M. 2020. Carbono en suelo, hierbas y arbustos en una plantación forestal en Jalisco, México. Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas 11(6):1377-1382.
Doi: 10.29312/remexca.v11i6.2427.

Aguirre-Calderón, O. A. 2015. Manejo Forestal en el Siglo XXI. Madera y Bosques 21:17-28. Doi:10.21829/myb.2015.210423.

Álvarez-López, P. S., A. Perales S. y E. Trujillo U. 2015. El subsector forestal mexicano y su apertura comercial. Revista Mexicana de Ciencias Forestales 6(29):8-23.
Doi:10.29298/rmcf.v6i29.213

Avendaño H., D. M., M. Acosta M., F. Carrillo A. y J. D. Etchevers B. 2009. Estimación de biomasa y carbono en un bosque de *Abies religiosa*. Fitotecnia Mexicana 32(3):233-238. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-73802009000300011 (7 de agosto de 2020).

Caballero D. M. 2017. Tendencia histórica de la producción maderable en el México Contemporáneo. Revista Mexicana de Ciencias Forestales 8(43):4-26.
Doi:10.29298/rmcf.v8i43.63.

- Carrillo A., F., M. Acosta M., E. Flores A., J. E. Juárez B. y E. Bonilla P. 2014. Estimación de biomasa y carbono en dos especies arbóreas en la Sierra Nevada, México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 5(5):679-693. Doi:10.29312/remexca.v5i5.901.
- Cerano P., J., J. Villanueva D., P. Z. Fulé, J. G. Arreola Á., I. Sánchez C., R. D. Valdez C. y G. García H. 2009. Reconstrucción de 350 años de precipitación para el suroeste de Chihuahua, México. *Madera y Bosques* 15(2): 27-44. Doi:10.21829/myb.2009.1521189.
- Cerano P., J., J. Villanueva D., R. D. Valdez C., J. Méndez G. y V. Constante G. 2011a. Sequías reconstruidas en los últimos 600 años para el noreste de México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 2(especial 2):235-249. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S2007-09342011000800006&script=sci_arttext (3 de agosto de 2020).
- Cerano P., J., J. Villanueva D., R. D. Valdez C., J. G. Arreola Á. y V. Constante G. 2011b. El Niño Oscilación del Sur y sus efectos en la precipitación en la parte alta de la cuenca del río Nazas. *Revista Chapingo serie Ciencias Forestales y del Ambiente* 17:207-215. Doi:10.5154/r.rchscfa.2010.09.076.
- Cerano P., J., J. Méndez G., A. Amaro S., J. Villanueva D., R. Cervantes M. y E. A. Rubio C. 2013. Reconstrucción de precipitación invierno-primavera con anillos anuales de *Pinus douglasiana* en la Reserva de la Biosfera Sierra de Manantlán, Jalisco. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente* 19(3):413-423. Doi: 10.5154/r.rchscfa.2013.02.007.
- Cerano P., J., J. Villanueva D., R. Cervantes M., L. Vázquez S., R. Trucios C. y V. Guerra de la C. 2014. Reconstrucción de precipitación invierno-primavera para el Parque Nacional Pico de Tancítaro, Michoacán. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía* 15(83):41-54. Doi: 10.14350/rig.35190.

Cerano-Paredes, J., J. Villanueva-Díaz, R. Cervantes-Martínez, P. Z. Fulé, L. Yocom, G. Esquivel-Arriaga y E. Jardel-Peláez. 2015. Historia de incendios en un bosque de pino de la Sierra de Manantlán, Jalisco, México. *Bosque (Valdivia)* 36(1):41-52. Doi:10.4067/S0717-92002015000100005.

Cerano-Paredes, J., J. Villanueva-Díaz, L. Vázquez-Selem, R. Cervantes-Martínez, G. Esquivel-Arriaga, V. Guerra-de la Cruz y P. Z. Fulé. 2016. Régimen histórico de incendios y su relación con el clima en un bosque de *Pinus hartwegii* al norte del estado de Puebla, México. *Bosque (Valdivia)* 37(2):389-399. Doi:10.4067/S0717-92002016000200017.

Cerano-Paredes, J., J. Villanueva-Díaz, L. Vázquez-Selem, R. Cervantes-Martínez, V. O. Magaña-Rueda, V. Constante-García, G. Esquivel-Arriaga and R. D. Valdez-Cepeda. 2019. Climatic influence on fire regime (1700 to 2008) in the Nazas watershed, Durango, Mexico. *Fire Ecology* 15(1):9. Doi:10.1186/s42408-018-0020-x.

Cerano-Paredes, J., J. M. Iniguez, J. Villanueva-Diaz, L. Vázquez-Selem, R. Cervantes-Martínez, G. Esquivel-Arriaga, O. Franco-Ramos and D. A. Rodríguez-Trejo. 2021. Effects of climate on historical fire regimes (1451–2013) in *Pinus hartwegii* forests of Cofre de Perote National Park, Veracruz, México. *Dendrochronologia* 65 125784. Doi:10.1016/j.dendro.2020.125784.

Chacón S., J. M. y J. Sánchez C. 1986. Dinámica de establecimiento de la regeneración de *Pinus arizonica* Engelm., en Madera, Chihuahua. *Ciencia Forestal en México* 59:15-42. <https://cienciasforestales.inifap.gob.mx/index.php/forestales/article/view/1207> (18 de agosto de 2020).

Chávez-León, G. 2019. Diversidad de mamíferos y aves en bosques de coníferas bajo manejo en el Eje Neovolcanico Transversal. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 10(56):85-112. Doi:10.29298/rmcf.v10i56.499.

- Díaz-Franco, R., M. Acosta-Mireles, F. Carrillo-Anzures, E. Buendía-Rodríguez, E. Flores-Ayala y J. D. Etchevers-Barra. 2007. Determinación de ecuaciones alométricas para estimar biomasa y carbono en *Pinus patula* Schl. et Cham. *Madera y Bosques* 13(1):25-34. <https://www.redalyc.org/pdf/617/61713103.pdf> (2 de agosto de 2020).
- Flores A., E., V. Guerra de la C., G. H. Terrazas G., F. Carrillo A., F. Islas G., M. Acosta M. y E. Buendía R. 2016. Intercepción de lluvia en bosques de montaña en la cuenca del Río Texcoco, México. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 7(37):65-76. Doi:10.29298/rmcf.v7i37.52.
- González H., A., R. Pérez M., F. Moreno S., G. Ramírez O., S. Rosales M., A. Cano P., V. Guerra de la C. y M. C. Torres E. 2015. Variabilidad de la temperatura local en bosques de coníferas por efectos de la deforestación. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 6(31):22-39. Doi:10.29298/rmcf.v6i31.193.
- Galicia, L. and A. E. Zarco A. 2014. Multiple ecosystem services, possible trade-offs and synergies in a temperate forest ecosystem in Mexico: a review. *International Journal of Biodiversity Science, Ecosystem Services y Management* 10(4): 275–288. Doi:10.1080/21513732.2014.973907.
- Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP). 2018. Programa de desarrollo del INIFAP 2018-2024: Mayor productividad en armonía con el medio ambiente. México, CDMX, México. 464 p. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/509563/Programa_de_Development_del_INIFAP_2018-2019.pdf (13 de agosto de 2020).
- Islas G., F. y M. A. Mendoza B. 1989. Modelos de regeneración y mortalidad para *Pinus arizonica* Engelm. *Ciencia Forestal en México* 14(66):34-43. <https://cienciasforestales.inifap.gob.mx/editorial/index.php/forestales/article/view/1131/2479> (5 de agosto de 2020).

- López B., W., R. Reynoso S., I. Castro M., E. Salinas C. y R. Magdaleno S. 2016. Capacidad de infiltración de la cuenca del Río Cuxtepeques, Chiapas, México. *Ingeniería Hidráulica y Ambiental* 37(3):103-112.
<http://scielo.sld.cu/pdf/riha/v37n3/riha08316.pdf> (25 de agosto de 2020).
- Magaña T., O. S., J. M. Torres R., C. Rodríguez F., H. Aguirre D. y A. M. Fierros G. 2008. Predicción de la producción y rendimiento de *Pinus rudis* Endl., en Aloapan, Oaxaca. *Madera y Bosques* 14(1):5-13. Doi:10.21829/myb.2008.1411214.
- Manzanilla, H. 1985. El Departamento de Manejo de Bosques Naturales. Secretaria de Agricultura y Recursos Hidráulicos. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales. México, D. F., México. Boletín técnico Núm. 137. 121 p.
- Martínez L., J. E., F. Carrillo A., M. Acosta M., M. E. Romero S. y R. Pérez M. 2020. Ecuaciones alométricas para estimar carbono en brinzales de *Pinus hartwegii* Lindl. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 11(60):144-160.
Doi:10.29298/rmcf.v11i60.726.
- Martínez S, M., G. Sosa P., J. M. Chacón S., A. Pinedo A. F. Villarreal G. y J. A. Prieto A. 2019. El monitoreo forestal por medio de Sitios Permanentes de Investigación Silvícola en Chihuahua, México. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 10(55):56-78. Doi:10.29298/rmcf.v10i55.511.
- Mas, P. J. y A. G. Pádua. 1989. El sitio permanente de experimentación silvícola "La Nieve" a 27 años de su establecimiento. *Ciencia Forestal en México* 66(14):44-96.
<https://cienciasforestales.inifap.gob.mx/editorial/index.php/forestales/article/view/1132/2480>
(20 de agosto de 2020).
- Mendoza B., M. A. y A. L. del Ángel P. 1999. Perspectivas del manejo forestal en México. *Ciencia Forestal en México* 24(86):5-19.
<http://cienciasforestales.inifap.gob.mx/index.php/forestales/article/view/932>
(4 de septiembre de 2020).

Millennium Ecosystem Assessment (MEA) 2005. Ecosystems and human well-being: Synthesis. Ecosystems (Vol. 5). Island Press. Washington, DC USA. 137 p.

<https://www.millenniumassessment.org/documents/document.356.aspx.pdf>
(25 de agosto de 2020).

Molina-Pérez, I. M., J. Cerano-Paredes, S. Rosales-Mata, J. Villanueva-Díaz, R. Cervantes-Martínez, G. Esquivel-Arriaga and E. H. Cornejo-Oviedo. 2016. Historical fire frequency (1779-2013) in pine-oak forests in the community of Charcos, Mezquital, Durango. *Revista Chapingo. Serie Ciencias Forestales y del Ambiente* 23(1):91-104. Doi:10.5154/r.rchscfa.2016.03.017.

Monárrez-González, J. C., G. Pérez-Verdín, C. López-González, M. A. Márquez-Linares y M. S. González-Elizondo. 2018. Efecto del manejo forestal sobre algunos servicios ecosistémicos en los bosques templados de México. *Madera y Bosques* 24(2):e2421569. Doi:10.21829/myb.2018.2421569.

Muñoz-Villers, L. E., F. Holwerda, M. Gómez-Cardenas, M. Equihua, H. Asbjornsen, L. A. Bruijnzeel, B. E. Marín-Castro and C. Tobón. 2012. Water balances of old-growth and regenerating montane cloud forests in central Veracruz, Mexico. *Journal of Hydrology* 462–463: 53–66. Doi:10.1016/j.jhydrol.2011.01.062.

Nieto de P. P., C., M. A. Musálem S. y J. C. Boyás D. 2003. Efecto de la vegetación asociada al sotobosque sobre el crecimiento y desarrollo inicial de *Abies religiosa* (HBK.) Schltdl. et Cham. *Ciencia Forestal en México* 28(94):7-22.
<http://cienciasforestales.inifap.gob.mx/editorial/index.php/forestales/article/view/881/2144>
(3 de agosto de 2020).

Pérez S., B., L., V. Guerra de la C., F. Carrillo A., M. Acosta M. y E. Buendía R. 2007. Respuesta de la regeneración natural en dos sistemas silvícolas aplicados en Tlaxco, Tlaxcala. *Ciencia Forestal en México* 32(102):39-56.
<https://cienciasforestales.inifap.gob.mx/editorial/index.php/forestales/article/view/749>
(21 de agosto de 2020).

Quiñonez-Barraza, G. W. y H. Ramírez-Maldonado. 2018. Can an exponential function be applied to the asymptotic density-size relationship? Two new stand-density indices in mixed-species forest. *Forest* 10(9):1-19. Doi:10.3390/f10010009.

Quiñonez-Barraza, G., J. C. Tamarit-Urias, M. Martínez-Salvador, X. García-Cuevas, H. M. de los Santos-Posadas y W. Santiago-García. 2018. Densidad máxima y diagrama de manejo de la densidad para bosques mezclados de Durango, México. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente* 24(1):73-90. Doi:10.5154/r.rchscfa.2017.09.056.

Quiñonez-Barraza, G., H. M. de los Santos-Posadas, J. G. Álvarez-González. y A. Velázquez-Martínez. 2014. Sistema compatible de ahusamiento y volumen comercial para las principales especies de *Pinus* en Durango, México. *Agrociencia* 48(5):553-567. www.scielo.org.mx/pdf/agro/v48n5/v48n5a8.pdf (15 de agosto de 2020).

Rodríguez F., C., H. Ramírez M., G. Zárate de Lara, A. Fierros G. y C. A. Ortiz S. 1988. Determinación de calidad de estación de *Pinus montezumae* Lamb. a través de análisis troncales en el Campo Experimental Forestal San Juan Tetla, Puebla. *Agrociencia* 72:87-94. <https://agris.fao.org/agris-search/search.do?recordID=MX19900111899> (2 de agosto de 2020).

Rodríguez-Trejo, D. A. and P. Z. Fulé. 2003. Fire ecology of Mexican pines and a fire management proposal. *International Journal of Wildland Fire* 12:23-37. Doi:10.1071/WF13214.

Serna P., A. y F. G. Echavarría C. 2002. Caracterización hidrológica en un agostadero comunal excluido al pastoreo en Zacatecas, México. II. Escurrimiento superficial. *Revista Técnica Pecuaria en México* 40(1):55-69. <https://cienciaspecuarias.inifap.gob.mx/index.php/Pecuarias/article/view/1314/1309> (13 de agosto de 2020).

Stahle, D. W., J. Villanueva D., D. J. Burnette, J. Cerano P., R. R. Heim, F. K. Fye, R. Acuña S., M. K. Therrell, M. K. Cleaveland and D. K. Stahle. 2011. Major Mesoamerican droughts of the past millennium. *Geophysical Research Letters* 38(5):L05703. Doi:10.1029/2010GL046472.

Stahle, D. W., D. J. Burnette, J. Villanueva D., J. Cerano P., F. K. Fye, R. D. Griffin, M. K. Cleaveland, D. K. Stahle, J. R. Edmondson and K. P. Wolff. 2012. Tree-ring analysis of ancient bald cypress trees and subfossil wood. *Quaternary Science Reviews* 34:1-15. Doi:10.1016/j.quascirev.2011.11.005.

Stahle, D. W., E. R. Cook, D. J. Burnette, J. Villanueva D., J. Cerano P., J. N. Burns, D. Griffin, B. I. Cook, R. Acuña S., M. C. A. Torbenson, P. Szejner and I. M. Howard. 2016. The Mexican Drought Atlas: Tree-ring reconstructions of the soil moisture balance during the late pre-Hispanic, colonial and modern eras. *Quaternary Science Reviews* 149:34-60. Doi :10.1016/j.quascirev.2016.06.018.

Tamarit-Urias, J. C., G. Quiñonez-Barraza y J. Hernández-Ramos. 2020. Aspectos metodológicos para generar diagramas de manejo de la densidad de rodales con base en el índice de Reineke. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 11(61):4-26. Doi:10.29298/rmcf.v11i61.728.

Torres R., J. M. y A. Guevara S. 2002. El potencial de México para la producción de servicios ambientales: captura de carbono y desempeño hidráulico. *Gaceta Ecológica* 63:40-59. <https://www.redalyc.org/pdf/539/53906303.pdf> (22 de julio de 2020).

Torres-Rojo, J. M., R. Moreno-Sánchez and M. A. Mendoza-Briseño. 2016. Sustainable Forest Management in Mexico. *Current Forestry Reports* 2:93-105. Doi:10.1007/s40725-016-0033-0.



Urbina H., S. D. 2017. Evolución, situación actual y Perspectivas del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. (INIFAP). *In*: SAGARPA. Memoria y Prospectiva de las Secretarías de Estado. Secretaria de Agricultura, Ganadería Pesca y Alimentación. Secretaría de Cultura, Instituto Nacional de Estudios Históricos de las Revoluciones de México, Secretaria de Agricultura, Ganadería Pesca y Alimentación. México, CDMX, México. pp. 535-563. <https://biblio.juridicas.unam.mx/bjv/detalle-libro/5278-secretaria-de-agricultura-ganaderia-desarrollo-rural-pesca-y-alimentacion> (3 de agosto de 2020).

Valles-Gandara, A. G., J. M. Torres-Rojo, A. Velázquez-Martínz y C. Rodríguez-Franco. 1998. Relación de nueve índices de competencia con el crecimiento en diámetro de *Pinus cooperi* Blanco. *Agrociencia* 32(3): 255–260.

https://www.researchgate.net/publication/308142024_Relacion_de_nueve_indices_de_competencia_con_el_crecimiento_en_diametro_de_Pinus_cooperi_Blanco (16 de julio de 2020).

Villanueva D., J., D. W. Stahle, B. H. Luckman, J. Cerano P., M. D. Therrell, M. K. Cleaveland and E. Cornejo O. 2007a. Winter-spring precipitation reconstructions from tree rings for northeast Mexico. *Climatic Change* 83(1):117-131. Doi:10.1007/s10584-006-9144-0.

Villanueva D., J., D. W. Stahle, B. H. Luckman and J. Cerano P. 2007b. Potential for dendrochronology of *Taxodium mucronatum* Ten. and its conservation in Mexico. *Ciencia Forestal en México* 32(101):9-37.

https://www.academia.edu/26414857/Potential_for_dendrochronology_of_Taxodium_mucronatum_Ten_and_its_conservation_in_Mexico (10 de agosto de 2020).



Villanueva D., J., J. Cerano P., V. Constante G., D. W. Stahle, J. Estrada Ávalos y M. M. Tostado P. 2011. Variabilidad hidroclimática histórica del norte de México inferida con anillos de crecimiento de Douglas-fir. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 2(número especial 2):221-334.

<http://www.scielo.org.mx/pdf/remexca/v2nspe2/v2spe2a5.pdf> (17 de septiembre de 2020).

Villanueva D., J., J. Cerano P., L. Vázquez S., D. W. Stahle, P. Z. Fulé, L. L. Yocom, O. Franco R. y J. A. Ruiz C. 2015. Red dendrocronológica del pino de altura (*Pinus hartwegii* Lindl.) para estudios dendroclimáticos en México. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía* 86:5-14. Doi: 10.14350/rig.42003.

Von Gadow, K., S. Sánchez O. y O. A. Aguirre C. 2004. Manejo forestal con bases científicas. *Madera y Bosques* 10(2):2-16. Doi:10.21829/myb.2004.1021271.

Zamora M., B. P., M. C. Zamora-Martínez, M. C. C. Nieto de Pascual. P y F. T. A. García C. 2018. Condiciones edáficas, abundancia y riqueza de hongos ectomicorrizicos comestibles. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 9(48):226-251. Doi:10.29298/rmcf.v8i48.152.

Zepeda B., E. M. y M. Acosta M. 2000. Incremento y rendimiento maderable de *Pinus montezumae* Lamb., en San Juan Tetla, Puebla. *Madera y Bosques* 6(1):15-27. Doi:10.21829/myb.2000.611339.



Todos los textos publicados por la **Revista Mexicana de Ciencias Forestales** –sin excepción– se distribuyen amparados bajo la licencia *Creative Commons 4.0 Atribución-No Comercial (CC BY-NC 4.0 Internacional)*, que permite a terceros utilizar lo publicado siempre que mencionen la autoría del trabajo y a la primera publicación en esta revista.