



# Perspectivas de los anillos de crecimiento para estimación potencial de carbono en México

## Perspectives of tree-rings growth for the potential estimation of carbon in Mexico

Ilana Bibiana Reyes-Basilio<sup>1</sup>, Andrea Cecilia Acosta-Hernández<sup>2</sup>, Marcos González-Cásares<sup>2</sup> y Marín Pompa-García<sup>\*</sup>

<sup>1</sup> Universidad Juárez del Estado de Durango. Facultad de Ciencias Forestales. Durango, Durango, México.

<sup>2</sup> Universidad Juárez del Estado de Durango. Programa Institucional de Doctorado en Ciencias Agropecuarias y Forestales. Durango, Durango, México.

<sup>\*</sup> Autor de correspondencia. mpgarcia@ujed.mx

### RESUMEN

Los anillos de crecimiento de los árboles han sido útiles como indicadores para estimar la captura de carbono en los ecosistemas forestales. México es considerado un país megadiverso con un gran potencial para las dendrociencias dada su alta variabilidad ambiental. El objetivo del presente estudio es presentar la perspectiva que ofrecen los anillos de crecimiento de los árboles para estimar la captura potencial de carbono en México. Se realizó una revisión bibliográfica a escala mundial, considerando estudios que abarcan *proxies* dendroecológicos sobre el contenido de carbono almacenado. La revisión incluyó 74 estudios publicados entre 2004 y 2019. Las investigaciones dendroecológicas del contenido de carbono se realizaron principalmente a partir de 2012 en México. La mayoría de estos estudios se basaron en especies como *Pinus sylvestris* y *Fagus sylvatica*. Adoptando un enfoque dendroecológico, asociado con técnicas alométricas este estudio ofrece una gran oportunidad para promover el desarrollo del estudio de la dinámica del carbono almacenado en México.

**PALABRAS CLAVE:** cambio climático; contenido de carbono; dendroecología; ITRBD.

### ABSTRACT

Tree growth rings have been useful as a *proxy* for estimating carbon sequestration in forest ecosystems. Mexico is considered a megadiverse country with a great potential for tree-ring sciences, given its high environmental variability. This study aimed to present a perspective that tree-rings offer in terms of estimating potential carbon uptake in Mexico. We reviewed papers published worldwide, considering studies that comprise dendroecological *proxies* for the content of stored carbon. The review included 74 studies that were published from 2004 to 2019. Dendroecological investigations of carbon content were conducted mainly since 2012 in Mexico. Most of these studies examined trees species such as *Pinus sylvestris* and *Fagus sylvatica*. Adopting a dendroecological approach, associated with allometric techniques, this study offers a great opportunity to promote the development of studies on carbon storage dynamics in Mexico.

**KEYWORDS:** climate change; carbon content; dendroecology; ITRBD.

## INTRODUCCIÓN

Los anillos de crecimiento son registros permanentes y continuos sobre el entorno ambiental en que se desarrollan los árboles. Diversas aplicaciones se han realizado en el mundo (Babst *et al.*, 2014a; De Micco *et al.*, 2016; Mundo *et al.*, 2017; Villanueva *et al.*, 2017; Pacheco, Camarero, Pompa-García, Voltas y Carrer, 2019). México, un país con gran diversidad de especies con potencial dendro-cronológico y dada su variabilidad hidroclimática y ambiental, es un sitio ideal para desarrollar aplicaciones en las dendrociencias. Por ejemplo, Acosta-Hernández, Pompa-García y Camarero (2017) refieren que la mayoría de los estudios publicados han examinado especies de bosques templados, destacando las pináceas en el norte y centro de México. Además, de estos estudios, 54% correspondió a aplicaciones climáticas, mientras que otros campos como la hidrología y la ecología permanecen escasamente abordados. Ello abre una oportunidad para nuevos enfoques que pueden contribuir a entender los mecanismos ecológicos y sus umbrales que experimentan las especies ante amenazas como los disturbios (Stoffel y Corona, 2014; Primicia *et al.*, 2015) y el calentamiento global (Bouma y Abrams, 2017). En particular, es bien sabido que los bosques constituyen un sumidero importante de carbono y consecuentemente representan una oportunidad para mitigar los efectos de los gases de efecto invernadero (Grassi *et al.*, 2017; Yao, Piao y Wang, 2018). Estos ecosistemas terrestres absorben grandes cantidades de CO<sub>2</sub> atmosférico producido por actividades humanas (Pan *et al.*, 2011). Así, cada anillo de crecimiento que se forma en el fuste puede ser directamente expresado en biomasa (Navar, 2009; Tang *et al.*, 2016) e implícitamente contiene alrededor de 50% de carbono (Pompa-García, Sigala-Rodríguez, Jurado y Flores, 2017; Thomas y Martin, 2012), permaneciendo almacenado mientras no se libere a la atmósfera mediante combustión.

En el mundo hay un gran número de estudios que están emergiendo de manera prominente como una alternativa dendroecológica para refinar las proyecciones del carbono terrestre (Babst *et al.* 2014a; Pompa-García,

Venegas-González, Júnior y Sigala-Rodríguez, 2018; González-Cásares *et al.* 2019). Sin embargo, en México esta aplicación es muy incipiente (Pompa-García y Venegas-González, 2016) y aún demanda mayor investigación al respecto. Los cálculos de carbono se basan en estudios de percepción remota (Ercanli, Günlü, Şenyurt, Bolat y Kahriman, 2016; Lu *et al.*, 2016; Jain y Levine, 2019), parcelas de remediación (Gayoso y Schlegel, 2001) y en muchos casos con muestreos destructivos (Fayolle *et al.*, 2018), cuya aplicación es puntual en el tiempo.

La temporalidad interanual que ofrecen los anillos de crecimiento provee una herramienta confiable para los manejadores y estudiosos del tema. Esta retrospectiva también demanda tiempo y recursos que la comunidad científica de las dendrociencias ha previsto no replicar al crear el ITRDB (The International Tree-Ring Data Bank). Esta base de datos mundial al servicio de la comunidad científica constituye un valioso recurso de investigación (Grissino-Mayer y Fritts, 1997), particularmente si se asocian con factores de expansión o ecuaciones alométricas de regresión para estimar carbono (Díaz-Franco *et al.*, 2007; Pompa-García *et al.*, 2018; Bueno-López, García-Lucas y Caraballo-Rojas, 2019).

## OBJETIVOS

El objetivo de estudio fue presentar una síntesis de la perspectiva que ofrecen los anillos de crecimiento como *proxies* dendroecológicos para la estimación potencial del carbono en México. Inicialmente se presenta el estado del arte mediante una revisión de literatura exhaustiva a escala mundial; complementariamente, se analizó el potencial que ofrece el ITRDB como registros dendroecológicos para la estimación del contenido de carbono.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Estudios de carbono a partir de anillos de crecimiento

Se realizó una investigación bibliográfica de artículos científicos desarrollados sobre el tema de captura de carbono a partir de anillos de crecimiento; no obstante, y



dado el objetivo del trabajo, el análisis bibliométrico se enfocó en la estimación de carbono a partir de anillos de crecimiento. Se utilizaron motores de búsqueda científica en Internet, a partir de buscadores como: Scopus, Redalyc, Google Scholar, Science Direct y Conricyt.

La búsqueda exhaustiva de literatura se realizó considerando todos los estudios realizados a escala mundial y publicados hasta el mes de octubre de 2019. Se utilizaron las siguientes palabras clave: “tree rings”, “carbon”, “wood density” y “biomass”. Se incluyeron aquellos estudios publicados en revistas indexadas, evitando la literatura no convencional (tesis, memorias de congresos, folletos técnicos, etc.).

Con la literatura encontrada se construyó una base de datos bibliográfica que contiene referencia, título del trabajo, año, revista, factor de impacto, fuente de financiamiento, dirección web, país del autor de correspondencia, número de autores, número de instituciones involucradas, objetivo del estudio, enfoque de aplicación, método seguido, área de influencia, país de estudio, estado, coordenadas geográficas (X, Y, Z), tipo de vegetación, especies y tipo de clima (Supl. 1).

La determinación del tipo de clima se realizó tomando como base el mapa mundial actualizado de la clasificación climática de Köppen-Geiger (Kottek, Grieser, Beck, Rudolf y Rubel, 2006), en la cual se categoriza en cinco climas principales: ecuatorial, árido, templado cálido, boreal y polar. La vegetación se categorizó con base en la clasificación de Olson *et al.* (2001), los cuales dividieron el mundo en ocho regiones biogeográficas dentro de las cuales se pueden identificar 14 biomas.

Adicionalmente se obtuvieron los recursos destinados a Ciencia y Tecnología por país, cuyos datos fueron obtenidos de la información publicada por el Banco Mundial (<https://www.bancomundial.org>).

### Perspectiva del potencial del ITRBD en México

Tomando en consideración que los anillos de crecimiento pueden ser de utilidad para reconstruir biomasa y carbono a lo largo del tiempo (Pompa-García y Venegas-González,

2016; Pompa-García *et al.* 2018; González-Cásares *et al.* 2019), en este trabajo se sistematizaron los datos de anillos de crecimiento disponibles en el ITRDB (National Oceanic and Atmospheric Administration [NOAA], s. f). Este repositorio contiene datos de más de 200 sitios a escala mundial, de seis continentes con más de 100 especies. En este estudio, la búsqueda se restringió a los disponible para la República Mexicana. Con la información encontrada se construyó una base de datos que contiene el nombre del sitio, código de la especie, país, especie, género, familia, longitud de la cronología, investigador, nombre del archivo, y coordenadas geográficas (X, Y, Z) (Supl. 2).

### RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A escala mundial, a lo largo de la historia se han generado una diversidad de estudios, que abordan los temas de captura de carbono a través de anillos de crecimiento (Babst *et al.*, 2014a, Babst, Bouriaud, Alexander, Trouet y Frank, 2014b; González-Cásares *et al.*, 2019).

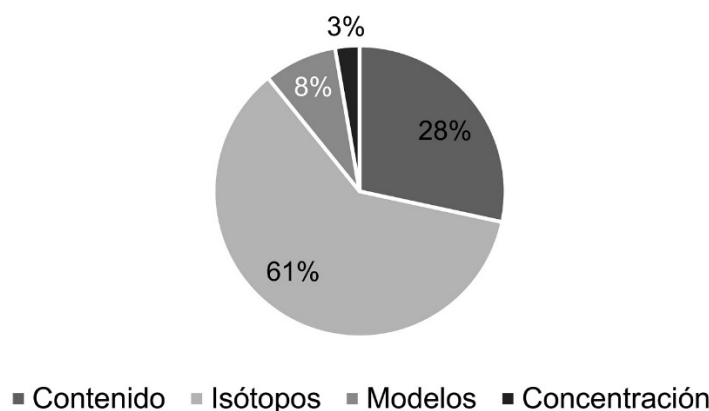
Existen diversas técnicas, desde aquellas como la densitometría de rayos X (Pompa-García y Venegas-González, 2016; González-Cásares *et al.*, 2019), el uso de ecuaciones alométricas (Liu, Zhang y Liu, 2012; Carnicer *et al.*, 2019), el desarrollo de modelos, así como los análisis isotópicos para investigar el contenido de carbono por unidad de materia seca (Pazdur *et al.*, 2007; Worbes y Raschke, 2012). Por lo anterior, este trabajo recupera relevancia científica al ser uno de los primeros intentos en sistematizar el conocimiento al respecto. Utilizar núcleos de crecimiento obtenidos mediante muestreos no destructivos impacta positivamente en el ecosistema, con resultados de alta precisión sin menoscabo de su confiabilidad estadística (Babst *et al.*, 2014b). Ello tiene implicaciones en las estrategias de manejo y adaptación de los bosques al cambio climático (Babst *et al.*, 2014a).

Aunque la variable central de este estudio se refiere a la estimación de carbono a partir de anillos de crecimiento, conviene inicialmente poner en contexto los distintos ámbitos de aplicación que han tenido dichos *proxies* sobre la estimación de carbono.

De la presente revisión surgieron 74 estudios que se agruparon en cinco diferentes enfoques (Fig. 1a). Los que se identifican con la palabra “contenido”, fueron aquellos en los cuales se realizaron las estimaciones del contenido (e.g. masa) de carbono de las especies muestreadas; estos representaron 21 estudios equivalentes a 28% del total. Las estimaciones en este tipo de estudios se realizaron en la mayoría de los casos utilizando densitometría con ecuaciones alométricas. Los estudios identificados en el ámbito de aplicación con la palabra “isótopos” fueron

aquellos en los cuales se realizaron los análisis isotópicos con fines paleoclimáticos principalmente, siendo los más numerosos con 61%. Los identificados con la palabra “modelos” comprende aquellos en los que se realizaron estimaciones a partir de muestras dendrocronológicas que sirvieron para alimentar modelos. De este grupo se encontraron 6 equivalentes a 8%. Por último, se encuentran los de “concentración” en los cuales únicamente se estimó la concentración química de la madera, correspondiendo a 3%.

a)



b)

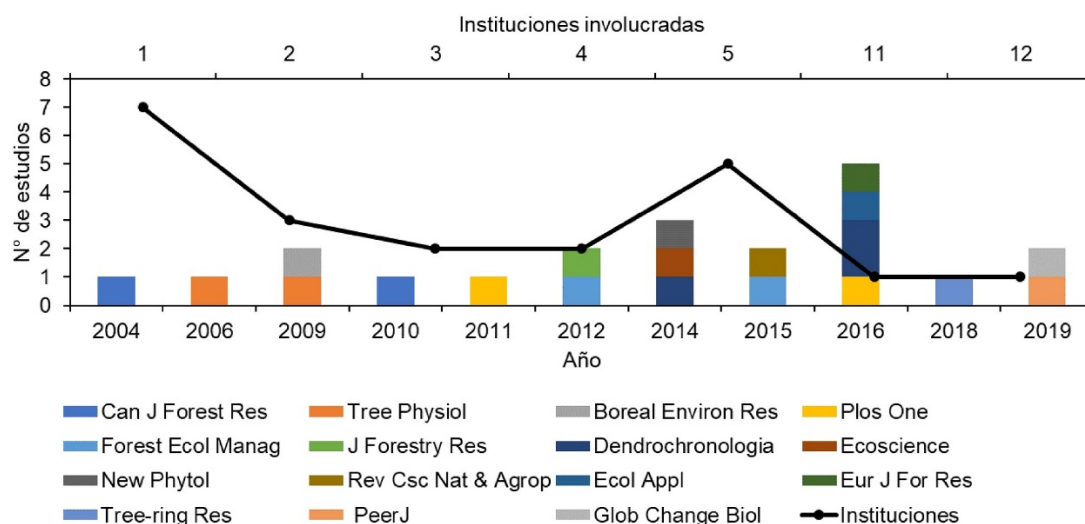


FIGURA 1. Diagnostico situacional de la investigación a nivel mundial de los anillos de crecimiento como *proxies* dendroecológicos para la estimación potencial de carbono, en términos de a) ámbito de aplicación, b) año y revista de publicación y número de instituciones involucradas.



Es evidente que la mayoría de los trabajos efectuados se han realizado en el ámbito de análisis isotópicos, dado que la fotosíntesis tiene diferentes formas de fijar carbono en las plantas (McCarroll y Loader, 2004). Los isótopos son muy utilizados en los anillos de crecimiento por su preciso fechado y la amplia distribución geográfica de los árboles, a comparación de los núcleos de hielo (Waterhouse, Switsur, Barker, Carter y Robertson, 2002). Sin embargo, una limitación en México es su alto costo y la escasa disponibilidad de tecnología especializada.

A pesar de que el análisis isotópico aventaja como indicador de controles fisiológicos en las variaciones de los anillos de crecimiento, la densitometría y las relaciones alométricas ofrecen una herramienta confiable para estimar contenido de carbono, que hasta ahora documenta 28% de trabajos (Fig. 1a). Ello abre una oportunidad estratégica de investigación, ante la diversidad florística de los ecosistemas mexicanos y sus condiciones multifactoriales que regulan el crecimiento anual. Afortunadamente en México y a pesar de limitada inversión en ciencia y tecnología, la bondad de estos *proxies* se ha documentado científicamente e insertado en la agenda internacional de las dendrociencias (Pompa-García y Venegas-González, 2016; Pompa-García *et al.*, 2018; González-Cásares *et al.* 2019).

El análisis bibliométrico arrojó que desde 2004 hasta el momento de esta investigación (octubre de 2019) se han documentado un total de 21 artículos. En ellos se aborda el potencial de los anillos de crecimiento para la estimación de carbono, que oscila alrededor de 50% de la biomasa (Thomas y Martin, 2012). Las estimaciones de captura de carbono utilizando anillos de crecimiento han ido aumentando en los últimos años. La figura 1b muestra cómo el número de estudios se incrementó el año 2016 cuando se publicaron el mayor número de investigaciones. La aparición de nuevas estrategias de investigación, como la alianza internacional multidisciplinaria entre científicos (Association for Tree-Ring Research [ATR], Tree Ring Society [TRS] y Red de dendroecología [DendroRed]), ha abierto la perspectiva de investigación en México, donde la dendroclimatología domina sobre la dendroecología, dendrogeomorfología, etc. (Acosta-Hernández *et al.*, 2017).

Los resultados de este trabajo muestran que la inclusión de autores pertenecientes a diferentes instituciones (Fig. 1c) evidencia una clara estrategia colectiva para realizar investigación, impactando positivamente en el desarrollo científico.

Los artículos citados fueron publicados en una amplia gama de revistas especializadas que abarcan diferentes ámbitos multidisciplinarios. Se muestra un total de 15 revistas, en la que más se publica fue en la “Dendrochronologia” que tiene un factor de impacto de 2.281 (Genet, Bréda y Dufrêne, 2009; Babst *et al.*, 2014a, 2014b; Pompa-García y Venegas-González, 2016). El enfoque editorial de esta revista hace propicio que las contribuciones sean dirigidas primordialmente a este medio como un espacio idóneo para la diseminar el conocimiento de las dendrociencias. Posteriormente se presentan con dos publicaciones cada una las siguientes: “Canadian Journal of Forest Research” con 1.703, “Forest Ecology and Management” con 3.126, “Plos One” con 2.776 y “Tree Physiology” con 3.477. Las 10 revistas restantes tienen una publicación en cada una de ellas y su factor de impacto va del 0.625 hasta el 8.88 de “Global Change Biology” (Fig. 1d).

Considerar a la dendroecología como una alternativa que ofrece parámetros confiables sobre la ecología forestal, incluyendo la estimación de carbono, ha sido crucial. En un cambio de paradigmas, Amoroso *et al.* (2017) demuestran la capacidad la dendroecología para refinar el estudio de los procesos ecológicos en los bosques. Ello se refleja en un cambio notable de crecimiento científico en espiral en México. Por ejemplo, México sobresale con cuatro trabajos de 17 países en los que se han realizado investigaciones para la estimación de carbono (Fig. 2a). Siguiendo a nuestro país se encuentra Alemania, Estados Unidos y Finlandia mostrando tres investigaciones cada uno realizadas a la fecha, a pesar de que son países que más invierten en este ámbito. En tercer lugar, se muestran cuatro países que han desarrollado un total de dos investigaciones y finalmente nueve países con un solo trabajo de estimación de carbono en anillos de crecimiento.

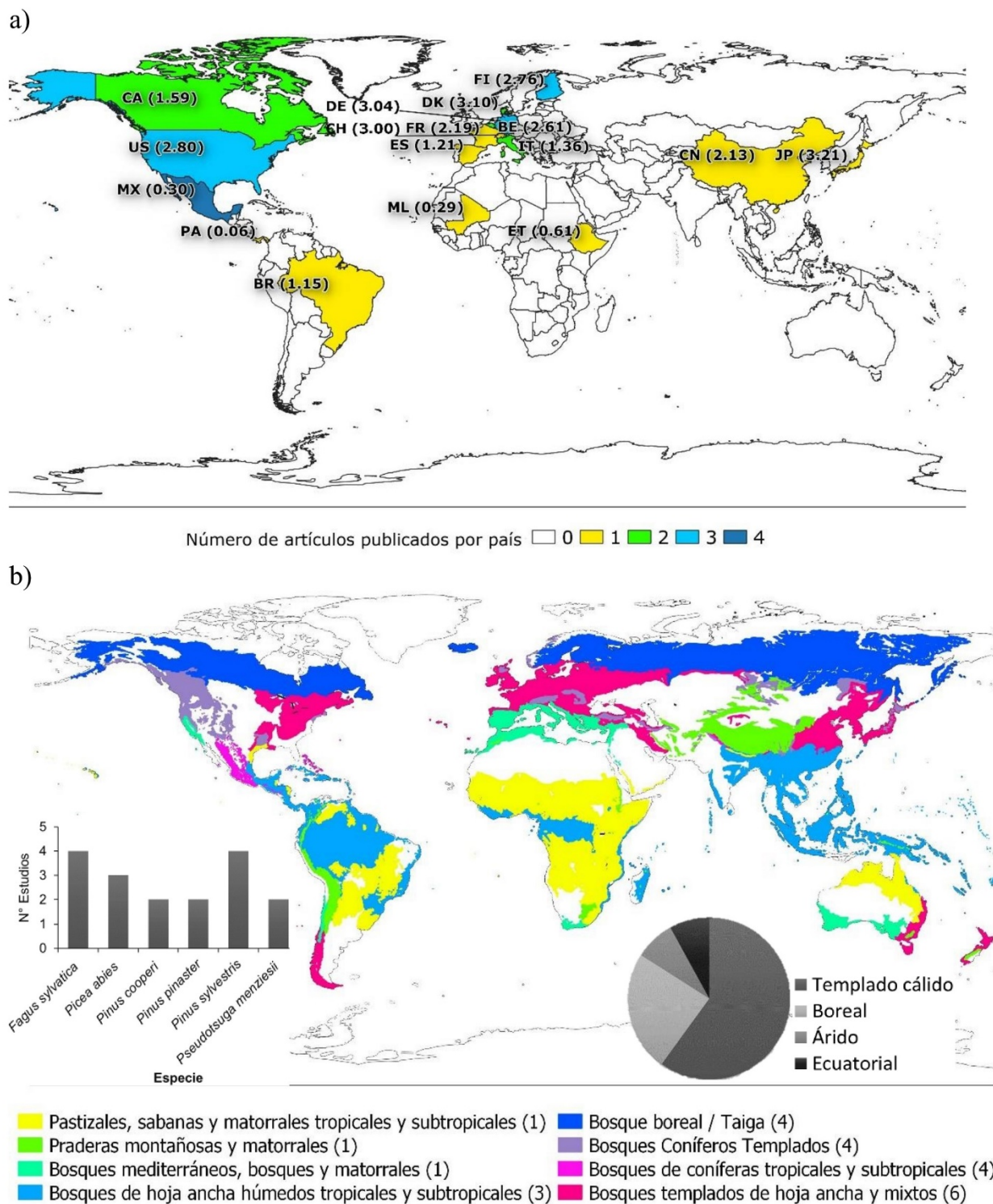


FIGURA 2. Perspectiva mundial de la investigación sobre anillos de crecimiento como proxies dendroecológicos para la estimación potencial de carbono, en términos de: a) número de estudios publicados a nivel global, incluyendo el Producto Interno Bruto destinado a la investigación; b) tipos de biomas terrestres, especies y clima de las publicaciones.



México no figura como gran inversor en el contexto del porcentaje de PIB destinado a Investigación y Desarrollo (I+D), aun cuando es el país con más trabajos elaborados en el tema de la dendroecología. Dinamarca, Japón y Suiza destinan alrededor de 10% del PIB a I+D y solo tienen hasta la fecha un trabajo de investigación en sus respectivos países; Alemania entra en este porcentaje de inversión de 10%, pero cuenta con tres proyectos hasta el momento en estimación de carbono por anillos de crecimiento. Panamá es el país que invierte menos de 1% en I+D, propiciando a tener menos investigaciones debido a la falta de recursos (Fig. 2a).

De los biomas existentes en los diferentes países resaltan los bosques templados de hoja ancha y mixtos, puesto que cuentan con las características adecuadas de alto potencial dendroecológico (Acosta-Hernández *et al.*, 2017). En bosques mediterráneos, pastizales templados, sabanas y matorrales existen muy pocos estudios realizados, probablemente por su limitado potencial dendrocronológico y baja representatividad biogeográfica (Fig. 2b).

En el tema de especies forestales que forman parte de los trabajos de investigación, sobresalen seis que son más utilizadas (Fig. 2b), como primer lugar están *Pinus sylvestris* L. y *Fagus sylvatica* L., apareciendo en cuatro investigaciones; seguido esta *Picea abies* (L.) H. Karst., en tres ocasiones, y en tercer lugar figuran tres especies en dos trabajos de *Pinus cooperi* C.E. Blanco, *Pinus pinaster* Aiton y *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco. Es evidente que México representa un área de oportunidad de investigación al respecto, dada su diversidad florística, importancia ecológica y valor económico (Sánchez-González, 2008).

La clasificación climática de Köppen-Geiger (Kottek *et al.* 2006) permitió clasificar los estudios realizados en cinco tipos. El templado cálido ocupa la mayor proporción en las investigaciones con 60%, seguido por el clima boreal con 24% del total. Finalmente, un pequeño porcentaje 8% es definido para el clima ecuatorial y árido (Fig. 2b), manifestando que también zonas con este clima muestran condiciones aptas para la investigación.

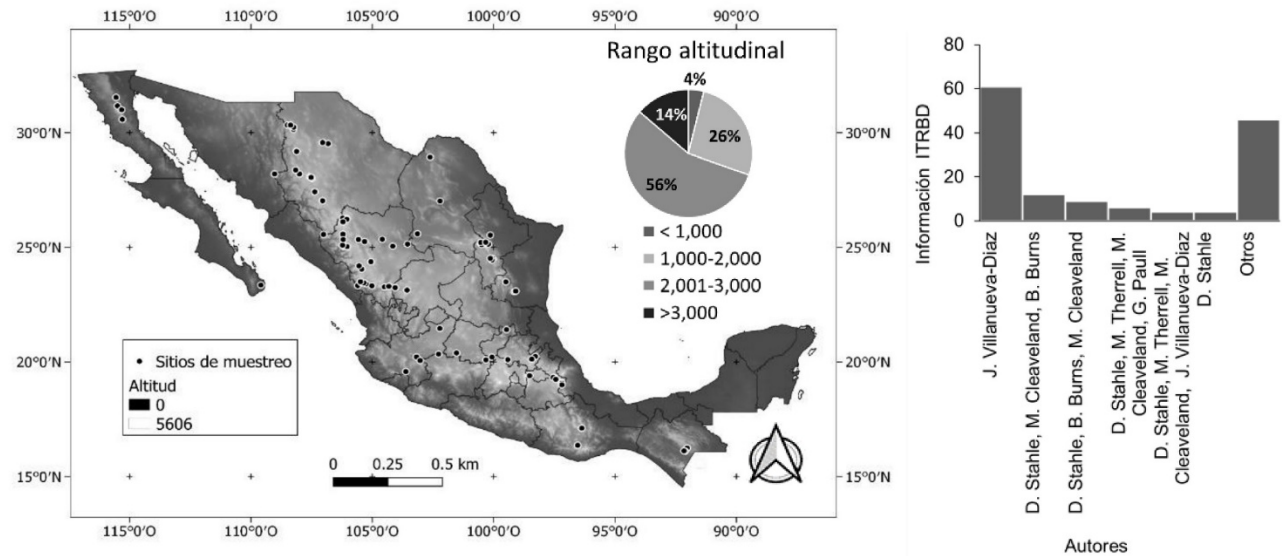
De la búsqueda realizada en el ITRDB se encontraron 142 cronologías, divididas en 116 claves distribuidas en la

República Mexicana para el periodo 779 al 2015 (Fig. 3a). Se encontró que 20 de ellas registran las tres amplitudes de madera (tardía, temprana y ancho total), mientras que las restantes se cuenta solo con el ancho total. En este sentido, los porcentajes encontrados fueron 72% para el ancho total de anillo, 14% para el ancho de madera temprana y 14% para el ancho de madera tardía. Cada cronología representa el crecimiento de al menos diez árboles de la misma especie, creciendo en el mismo sitio. Los intervalos de altitud se muestran en la Fig. 3a, los cuales presentaron una mayor cantidad de datos de anillos de crecimiento para sitios que se encuentran entre 1000 m y 2000 m snm, seguidos por aquellos que se encuentran a una altitud superior a 2000 m e inferior a 3000 m snm. Para altitudes mayores a 3000 m fue para las que se obtuvo el menor número de datos. Ello abre una oportunidad para estudiar la acumulación de carbono en bosques de las mayores altitudes. Se ha documentado que los ecotonos donde crecen los últimos árboles en su límite máximo altitudinal son ideales para monitorear los procesos ecológicos (Fajardo y Piper, 2017). Los factores ambientales que controlan el crecimiento de las especies en estos umbrales son notablemente registrados por los anillos de los árboles. Por ejemplo, las temperaturas como factores limitantes del metabolismo y sus implicaciones en el crecimiento radial (Rossi, Deslauriers, Anfodillo y Carraro, 2007) merecen investigarse ante la variabilidad hidroclimática (Manzanilla-Quñones, Aguirre-Calderón, Jiménez-Pérez, Treviño-Garza y Yerena-Yamalle, 2019).

La disposición espacial de la figura 3a debe ser considerada de forma cauta. El muestreo realizado tuvo un propósito diferente al que se persigue en este estudio. Sus parámetros estadísticos estuvieron enfocados en su mayoría a lograr la señal climática de la población Wigley, Briffa y Jones (1984), o en su caso la variabilidad común del crecimiento entre árboles, medida usualmente como intercorrelación media entre series. Estos parámetros aplicados a los fines de captura de carbono resultarían insuficientes. En su caso, se sugiere buscar las estrategias adecuadas de muestreo y sus procedimientos para extrapolación (Pompa-García *et al.*, 2018), además de incluir expertos en campos de ecología, manejo forestal y estadístico.



a)



b)

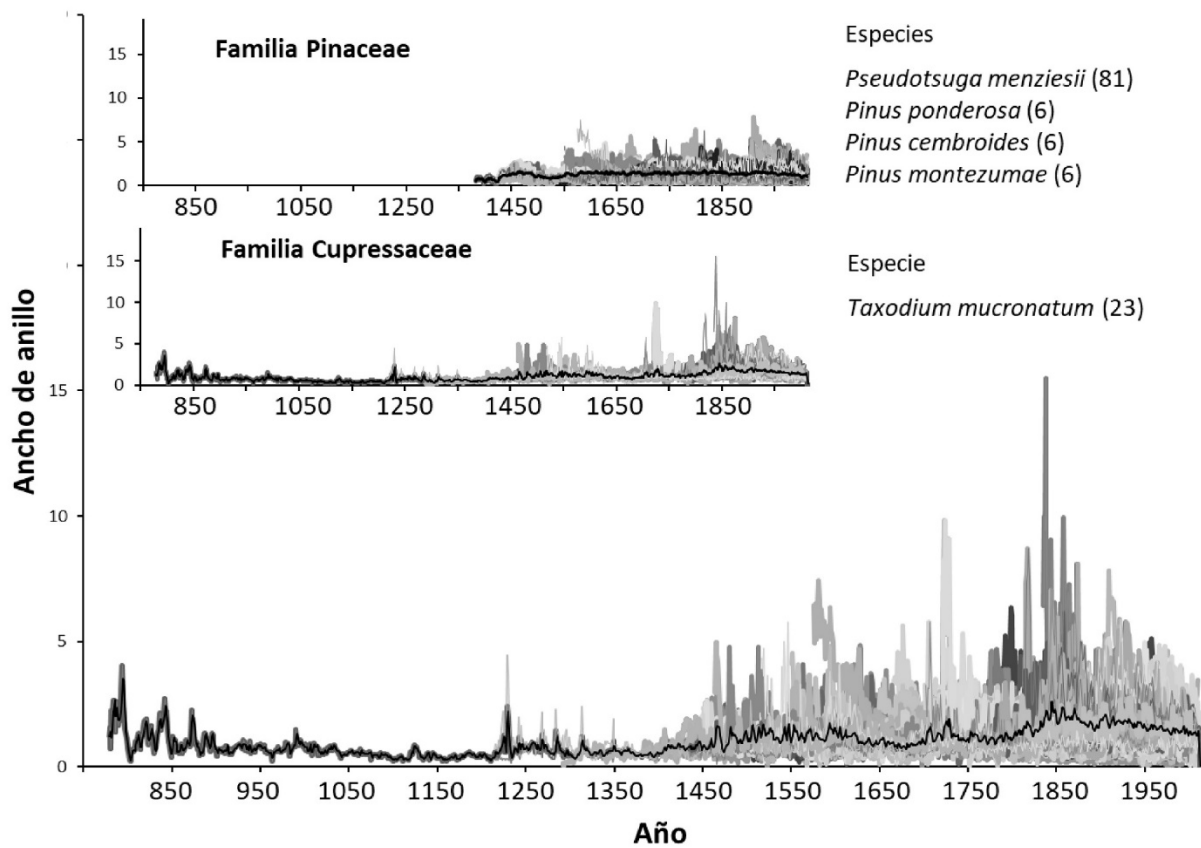


FIGURA 3. Perspectiva espacio temporal (a) de las contribuciones por investigadores (b) sobre anillos de crecimiento disponibles en el ITRBD para la república mexicana.





Las especies más muestreadas fueron *Pseudotsuga menziesii*, *Taxodium mucronatum* y *Pinus cembroides* con 52%, 18.6% y 5.9%, respectivamente (Fig. 3b). Los autores que más contribuyeron a esta base de datos se presentan en la gráfica de la figura 3a. Es evidente el volumen de datos que se ha generado por investigadores del norte de México y sur de Estados Unidos, gracias a las estrategias colaborativas internacionales y la infraestructura disponible. Aunque estos archivos históricos, han sido utilizados primordialmente para fines de reconstrucciones hidroclimáticas, convendría potenciar su aplicación en estimaciones de biomasa y carbono. Las ecuaciones de biomasa generadas por Navar (2009) y aquellas publicadas por Rojas-García, De Jong, Martínez-Zurimendi y Paz-Pellat (2015) ofrecen ampliar las aplicaciones de las dendrociencias en México. La diversidad de especies consideradas es acorde con datos del inventario nacional forestal; por tanto, la amplitud temporal disponible en el ITRBD complementa los insumos idóneos para mejorar las modelaciones de carbono en México.

## CONCLUSIONES

Esta investigación permitió documentar la bibliografía científica sobre estimación de captura de carbono a partir de anillos de crecimiento. México tiene alto potencial para desarrollar trabajos de investigación en el campo de las dendrociencias, a pesar de que otros países con mayor escala de desarrollo destinan mayor inversión a este ámbito. Los anillos de crecimiento ofrecen una perspectiva precisa y confiable al ser aplicados para estimar carbono, pero su empleo aún es incipiente. Estos archivos naturales contribuyen significativamente para preservar evidencia de la captura de carbono histórica en nuestro país. La red de cronologías mexicanas representa información sustancial para modelar espacial y temporalmente el almacén de carbono en los ecosistemas forestales mexicanos. Existe un área de oportunidad en los bosques alpinos y subalpinos de México. Por tanto, estos resultados contribuyen a incrementar el conocimiento sobre la dinámica del carbono global.

## RECONOCIMIENTOS

Se reconocen los créditos correspondientes al proyecto A1-S-21471 CB2017-2018 apoyado por el Fondo Sectorial de Investigación para la Educación. Se agradece el apoyo a DendroRed de la Universidad Juárez del Estado de Durango. Así mismo, se aprecia el esfuerzo de los revisores anónimos cuyas contribuciones mejoraron el manuscrito final.

## REFERENCIAS

- Acosta-Hernández, A. C., Pompa-García, M., & Camarero, J. J. (2017). An updated review of dendrochronological investigations in Mexico, a megadiverse country with a high potential for tree-ring sciences. *Forests*, 8(5), 160. doi: 10.3390/f8050160
- Amoroso, M. M., Daniels, L. D., Baker, P. J., & Camarero, J. J. (2017). *Dendroecology: tree-ring analyses applied to ecological studies*. Ecological Studies Analysis and Synthesis. Berlin/Heidelberg, Germany: Springer.
- Association for Tree-Ring Research [ATR]. (s. f.). Recuperado de <http://www.tree-ring.org/>
- Babst, F., Bouriaud, O., Papale, D., Gielen, B., Janssens, I. A., Nikinmaa, E., Ibrom, A., Wu, J., Bernhofer, C., Köstner, B., Grünwald, T., Seufert, G., Ciais, P., & Frank, D. (2014a). Above-ground woody carbon sequestration measured from tree rings is coherent with net ecosystem productivity at five eddy-covariance sites. *New Phytologist*, 201(4), 1289-1303. doi: 10.1111/nph.12589
- Babst, F., Bouriaud, O., Alexander, R., Trouet, V., & Frank, D. (2014b). Toward consistent measurements of carbon accumulation: A multi-site assessment of biomass and basal area increment across Europe. *Dendrochronologia*, 32(2), 153-161. doi: 10.1016/j.dendro.2014.01.002
- Bouma, C. L., & Abrams, M. D. (2017). Differential impacts of climate on tree rings across a topographic gradient. *International Journal of Environment and Climate Change*, 7(2), 92-112. doi: 10.9734/BJECC/2017/33378
- Bueno-López, S., García-Lucas, E., & Caraballo-Rojas, L. (2019). Ecuaciones alométricas para biomasa y contenido de carbono en árboles individuales de *Pinus occidentalis*. *Madera y Bosques*, 25(3), e2531968. doi: 10.21829/myb.2019.2531868
- Carnicer, J., Domingo-Marimon, C., Ninyerola, M., Camarero, J., Bastos, A., López-Parages, J., Blanquer, L., Rodríguez-Fonseca, B.,

- Lenton, T., Dakos, V., Ribas, M., Gutiérrez, E., Peñuelas, J., & Pons, X. (2019). Regime shifts of Mediterranean forest carbon uptake and reduced resilience driven by multidecadal ocean surface temperatures. *Global Change Biology*, 25(8), 2825-2840. doi: 10.1111/gcb.14664
- De Micco, V., Campelo, F., De Luis, M., Bräuning, A., Grabner, M., Battipaglia, G., & P. Cherubini. (2016). Intra-annual density fluctuations in tree rings: how, when, where, and why? *LAIWA Journal*, 37(2), 232-259. doi: 10.1163/22941932-20160132
- Díaz-Franco, R., Acosta-Mireles, M., Carrillo-Anzures, F., Buendía-Rodríguez, E., Flores-Ayala, E., & Etchevers-Barra, J. D. (2007). Determinación de ecuaciones alométricas para estimar biomasa y carbono en *Pinus patula* Schl. et Cham. *Madera y Bosques*, 13(1), 25-34. doi: 10.21829/myb.2007.1311233
- Ercanli, İ., Günlü, A., Şenyurt, M., Bolat, F., & Kahriman, A. (2016). *Artificial neural network for predicting stand carbon stock from remote sensing data for even-aged scots pine (Pinus sylvestris L.) Stands in the taşköprü-çiğlik forests*. 1st International Symposium of Forest Engineering and Technologies (FETEC 2016): Forest Harvesting and Roding in Environmentally Sensitive Areas, 02-04 June 2016, 2016, Bursa, Turkey.
- Fayolle, A., Ngomanda, A., Mbasi, M., Barbier, N., Bocko, Y., Boyemba, F., & Kondouale, H. J. (2018). A regional allometry for the Congo basin forests based on the largest ever destructive sampling. *Forest Ecology and Management*, 430(15), 228-240. doi: 10.1016/j.foreco.2018.07.030
- Gayoso, J., & Schlegel, B. (2001). Guía para la formulación de proyectos forestales de carbono. Universidad Austral de Chile. Proyecto FONDEF D 98I1076. Valdivia, Chile.
- Genet, H., Bréda, N., & Dufrêne, E. (2009). Age-related variation in carbon allocation at tree and stand scales in beech (*Fagus sylvatica* L.) and sessile oak (*Quercus petra* (Matt.) Liebl.) using a chronosequence approach. *Tree Physiology*, 30(2), 177-192. doi: 10.1093/treephys/tpp105
- González-Cásares, M., Pompa-García, M., Venegas-González, A., Domínguez-Calleros, P., Hernández-Díaz, J., Carrillo-Parra, A., & González-Tagle, M. (2019). Hydroclimatic variations reveal differences in carbon capture in two sympatric conifers in northern Mexico. *Peer Journal*, 7, e7085. doi: 10.7717/peerj.7085
- Grassi, G., House, J., Dentener, F., Federici, S., den Elzen, M., & Penman, J. (2017). The key role of forests in meeting climate targets requires science for credible mitigation. *Nature Climate Change*, 7(3), 220-226. doi: 10.1038/nclimate3227
- Grissino-Mayer, H. D., & Fritts, H. C. (1997). The International Tree-Ring Data Bank: an enhanced global database serving the global scientific community. *The Holocene*, 7(2), 235-238. doi: 10.1177/095968369700700212
- Jain, J. J., & Levine, D. (2019). U.S. Patent No. 10,431,095. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
- Kottek, M., Grieser, J., Beck, C., Rudolf, B., & Rubel, F. (2006). World map of the Köppen-Geiger climate classification updated. *Meteorologische Zeitschrift*, 15(3), 259-263. doi: 10.1127/0941-2948/2006/0130
- Liu, Y., Zhang, Y., & Liu, S. (2012). Aboveground carbon stock evaluation with different restoration approaches using tree ring chronosequences in Southwest China. *Forest Ecology and Management*, 263(1), 39-46. doi: 10.1016/j.foreco.2011.09.008
- Lu, D., Chen, Q., Wang, G., Liu, L., Li, G., & Moran, E. (2016). Un estudio de los métodos de estimación de biomasa aérea basados en sensores remotos en ecosistemas forestales. *Revista Internacional de Tierra Digital*, 9(1), 63-105.
- Manzanilla-Quinones, U., Aguirre-Calderón, Ó. A., Jiménez-Pérez, J., Treviño-Garza, E. J., & Yereña-Yamallel, J. I. (2019). Distribución actual y futura del bosque subalpino de *Pinus hartwegii* Lindl en el Eje Neovolcánico Transversal. *Madera y bosques*, 25(2), e2521804. doi: 10.21829/myb.2019.2521804
- McCarroll, D., & Loader, N. J. (2004). Stable isotopes in tree rings. *Quaternary Science Reviews*, 23(7-8), 771-801. doi: 10.1016/j.quascirev.2003.06.017
- Mundo, I. A., Villalba, R., Veblen, T. T., Kitzberger, T., Holz, A., Paritsis, J., & Ripalta, A. (2017). Fire history in southern Patagonia: human and climate influences on fire activity in *Nothofagus pumilio* forests. *Ecosphere*, 8(9), e01932. doi: 10.1002/ecs2.1932
- Návar J. (2009). Allometric equations for tree species and carbon stocks for forests of northwestern Mexico. *Forest Ecology and Management*, 257(2), 427-434. doi: 10.1016/j.foreco.2008.09.028
- National Oceanic and Atmospheric Administration [NOAA]. (s. f). Paleoclimatology Data. Recuperado de <http://www.ncdc.noaa.gov/paleo/treering.html>
- Olson, D. M., Dinerstein, E., Wikramanayake, E. D., Burgess, N. D., Powell, G. V., Underwood, E. C., D'amico, J. A., Itoua, I., Strand, H. E., Morrison, J. C., Loucks, C. J., Allnutt, T. F., Ricketts, T. H., Kura, Y., Lamoreux, J. F., Wettengel, W. W., Hedao, P., & Kassem, K. R. (2001). Terrestrial ecoregions of the world: a new map of life on earth a new global map of terrestrial ecoregions provides an innovative tool for conserving biodiversity. *BioScience*, 51(11), 933-938. doi: 10.1641/0006-3568(2001)051[0933:TEOTWA]2.0.CO;2



- Pacheco, J. A., Camarero, J. J., Pompa-García, M., Voltas, J., & Carrer, M. (2019). Growth, wood anatomy and stable isotopes show species-specific couplings in three Mexican conifers inhabiting drought-prone áreas. *Science of The Total Environment*, 68(1), 134055. doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.134055
- Pan, Y., Birdsey, R. A., Fang, J., Houghton, R., Kauppi, P. E., Kurz, W. A., Phillips, O. L., Shvidenko, A., Lewis, S. L., Canadell, J. G., Ciais, P., Jackson, R. B., Pacala, S. W., McGuire, A. D., Piao, S., Rautiainen, A., Sitch, S., & Hayes, D. (2011). A large and persistent carbon sink in the world's forests. *Science*, 333(6045), 988-993. doi: 10.1126/science.1201609
- Pazdur, A., Nakamura, T., Paweczyk, S., Pawlyta, J., Piotrowska, N., Rakowski, A., Sensula, B., & Szczepanek, M. (2007). Carbon isotopes in tree rings: climate and the Suess effect inferences in the last 400 years. *Radiocarbon*, 49(2), 775-788. doi: 10.1017/S003382220004265X
- Pompa-García, M., Sigala-Rodríguez, J. A., Jurado, E., & Flores, J. (2017). Tissue carbón concentration of 175 Mexican forest species. *iForest*, 10(4), 754-758. doi: 10.3832/for2421-010
- Pompa-García, M., & Venegas-González, A. (2016). Temporal variation of wood density and carbon in two elevational sites of *Pinus cooperi* in relation to climate response in northern Mexico. *PLoS ONE*, 11(6), e0156782. doi: 10.1371/journal.pone.0156782
- Pompa-García, M., Venegas-González, A., Júnior, A. A., & Sigala-Rodríguez, J. A. (2018). Dendroecological approach to assessing carbon accumulation dynamics in two *Pinus* species from northern Mexico. *Tree-ring research*, 74(2), 196-209. doi: 10.3959/1536-1098-74.2.196
- Primicia, I., Camarero, J. J., Janda, P., Čada, V., Morrissey, R. C., Trotsiuk, V., Bače, R., Teodosiu, M., & Svoboda, M. (2015). Age, competition, disturbance and elevation effects on tree and stand growth response of primary *Picea abies* forest to climate. *Forest Ecology and Management*, 354(15), 77-86. doi: 10.1016/j.foreco.2015.06.034
- Red de dendroecología [DendroRed]. (s. f.). Recuperado de <https://dendrored.ujed.mx/>
- Rossi, S., Deslauriers, A., Anfodillo, T., & Carraro, V. (2007). Evidence of threshold temperatures for xylogenesis in conifers at high altitudes. *Oecologia*, 152, 1-12. doi: 10.1007/s00442-006-0625-7
- Rojas-García, F., De Jong, B. H., Martínez-Zurimendi, P., & Paz-Pellat, F. (2015). Database of 478 allometric equations to estimate biomass for Mexican trees and forests. *Annals of Forest Science*, 72(6), 835-864. doi: 10.1007/s13595-015-0456-y
- Sánchez-González, A. (2008). Una visión actual de la diversidad y distribución de los pinos de México. *Madera y Bosques*, 14(1), 107-120. doi: 10.21829/myb.2008.1411222
- Stoffel, M., & Corona, C. (2014). Dendroecological dating of geomorphic disturbance in trees. *Tree-Ring Research*, 70(1), 3-20. doi: 10.3959/1536-1098-70.1.3
- Tang, X., Lu, Y., Fehrmann, L., Forrester, D. I., Guisasa-Rodríguez, R., Pérez-Cruzado, C., & Kleinn, C. (2016). Estimation of stand-level aboveground biomass dynamics using tree ring analysis in a Chinese fir plantation in Shitai County, Anhui Province, China. *New Forests*, 47(2), 319-332. doi: 10.1007/s11056-015-9518-0
- Thomas, S. C., & Martin, A. R. (2012). Carbon content of tree tissues: a synthesis. *Forests* 3: 332-352. doi: 10.3390/f3020332
- Tree Ring Society [TRS]. (s. f.). Paleoclimatology Data. Recuperado de <http://www.treeringsociety.org/>
- Villanueva, J., Gómez, A., Cerano, J., Rosales, S., Estrada, J., Castruita, L. U., & Martínez, A. R. (2017). La variabilidad del caudal del río Acaponeta inferida mediante series de anillos de crecimiento en coníferas. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 8(3), 55-74. doi: 10.24850/j-tyca-2017-03-04
- Yao, Y., Piao, S., & Wang, T. (2018). Future biomass carbon sequestration capacity of Chinese forests. *Science Bulletin*, 63(17), 1108-1117. doi: 10.1016/j.scib.2018.07.015
- Waterhouse, J. S., Switsur, V. R., Barker, A. C., Carter, A. H. C., & Robertson, I. (2002). Oxygen and hydrogen isotope ratios in tree rings: how well do models predict observed values? *Earth and Planetary Science Letters*, 201(2), 421-430. doi: 10.1016/S0012-821X(02)00724-0
- Wigley, T. M., Briffa, K. R., & Jones, P. D. (1984) On the average value of correlated time series, with applications in dendroclimatology and hydrometeorology. *Journal of Climate and Applied Meteorology*, 23(2), 201-213. doi: 10.1175/1520-0450(1984)023<0201:OTAVOC>2.0.CO;2
- Worbes, M., & Raschke, N. (2012). Carbon allocation in a Costa Rican dry forest derived from tree ring análisis. *Dendrochronologia*, 30(3), 231-238. doi: 10.1016/j.dendro.2011.11.001.

Manuscrito recibido el 23 de enero 2020

Aceptado el 2 de marzo de 2020

Publicado el 30 de septiembre de 2020

Este documento se debe citar como:

Reyes-Basilio, I. B., Acosta-Hernández, A. C., González-Cázares, M., & Pompa-García, M. (2020). Perspectivas de los anillos de crecimiento para estimación potencial de carbono en México. *Madera y Bosques*, 26(3), e2632112. doi: 10.21829/myb.2020.2632112



Madera y Bosques por Instituto de Ecología, A.C. se distribuye bajo una Licencia Creative Commons Atribución-NoComercialCompartirIgual 4.0 Internacional.