

Drones y Dendro: un vínculo estratégico de desarrollo tecnológico para la gestión forestal

Drones and Dendro: a strategic technological development link for forest monitoring

Marín Pompa García*
Eduardo Daniel Vivar Vivar

Laboratorio de Dendroecología, Facultad de Ciencias Forestales y Ambientales, Universidad Juárez del Estado de Durango. Río Papaloapan y Blvd. Durango, s/n, Col. Valle del Sur, Durango, Durango, 34120, México.

*Autor para correspondencia: mpgarcia@ujed.mx

Resumen

Los bosques son un asunto de interés nacional y constituyen un recurso estratégico para la sociedad en su conjunto. Sin embargo, enfrentan desafíos que merecen abordarse con tecnologías de vanguardia. En particular, el cambio climático ha provocado cambios en estructuras y la biogeografía de las masas forestales. A partir de una revisión documental, aquí se enfatizan las lecciones aprendidas por el grupo de investigación de DendroRed (<https://dendrored.ujed.mx/>) en los últimos cinco años. En primera instancia se demuestra que los anillos de crecimiento constituyen fuentes confiables de los procesos ecológicos que están enfrentando los árboles. Su disección temporal ha permitido refinar el entendimiento de las respuestas al clima, así como su potencialidad de reconstruir almacenes de carbono a nivel de árbol individual. La integración de estos archivos naturales con técnicas de percepción remota ha elucidado la modificación estacional del clima. El monitoreo a través de vehículos aéreos no tripulados (VANT) oferta una perspectiva espacial y espectral usualmente ignorada, pero con grandes potencialidades en el monitoreo forestal. En específico, se documentan las bondades en estimación de atributos aéreos del dosel, así como índices sobre la dinámica foliar y se mencionan áreas de oportunidad. Todo este conocimiento puede integrarse en un paquete tecnológico para monitoreo de los recursos forestales y tiene repercusiones en la productividad forestal. No obstante, merece esfuerzos adicionales para incidir en las políticas de la gestión forestal.

Palabras clave: DendroRed, Anillos de crecimiento, Cambio climático, monitoreo forestal.

Abstract

Forests are a matter of national interest and represent a strategic resource for society. However, forests face challenges that deserve to be addressed with state-of-the-art technologies. Climate change, in particular, has led to changes in the structure and biogeography of forest stands. Based on a literature review, the lessons learned by the DendroRed research group (<https://dendrored.ujed.mx/>) over the last five years are highlighted here. First, it is proved that growth rings are reliable sources of ecological processes faced by trees. Their temporal dissection has refined the understanding of climate responses, as well as their potential to reconstruct carbon stocks at tree level. The integration of these natural records with remote sensing techniques has elucidated the seasonal modification of climate. Unmanned aerial vehicle (UAV) monitoring offers a spatial and spectral perspective usually ignored, but with great potential in forest monitoring. We document the benefits in estimating aerial attributes of the canopy, as well as indices on foliar dynamics and mention areas of opportunity. All this knowledge can be integrated into a technological package for monitoring forest resources and has impacts on forest productivity. However, it deserves additional efforts to influence forest management policies.

Keywords: DendroRed, Drones, Growth rings, Climate change, forest monitoring.

Introducción

Las sequías cada vez son más recurrentes y de mayor intensidad (Domínguez, 2016) y afectan la biogeografía, composición y estructura de los bosques. En Durango, en el 2011 se reportó la muerte de más de dos millones de árboles atribuidos a la sequía como factor desencadenante de mortalidad y decaimiento forestal (<https://www.20minutos.com.mx/noticia/b259360/s-e-recupera-bosque-en-durango-despues-de-sequia-y-plaga/>).

Para la comunidad científica es urgente y necesario entender los mecanismos que subyacen en este fenómeno para disminuir su impacto negativo en beneficio de los poseedores y manejadores del recurso forestal. A través del estudio de anillos de crecimiento, considerados como “archivos naturales” (Fritts, 2012) es posible reconstruir los acontecimientos físicos que ha experimentado el árbol. De esta forma, diversas aplicaciones han tenido lugar para estudiar disturbios (Altman et al. 2013), incendios forestales (Kames *et al.* 2011), sequías (Li et al. 2007), entre otros fenómenos que comprenden las dendrociencias (Acosta-Hernández *et al.* 2017).

Cuando estos proxies son refinados en su resolución temporal de años a meses o semanas, exponencialmente también se mejoran las señales ecofisiológicas de los árboles al cambio ambiental (de Micco *et al.* 2019). Adicionalmente, la incorporación de la perspectiva espectral obtenida por sensores remotos amplía la magnitud de procesos usualmente ignorados por las interpretaciones técnicas en la silvicultura. Por ejemplo, a la comunidad científica ha llamado la atención que la formación de una delgada capa de células en el cambium vascular (i.e. xilogenesis, ver Cuny y Rathgeber, 2016) da cuenta de la dinámica temporal del clima (Pompa-García *et al.* 2021).

Ello recobra importancia ante el advenimiento de la tecnología de vanguardia (Gallardo-Salazar *et al.* 2020) y la exigencia de modernizar procedimientos biométricos que reduzcan los muestreos destructivos, sin menoscabo de la validez estadística de los resultados. Generar estos desarrollos tecnológicos, exige la convergencia de esfuerzos interdisciplinarios e institucionales de

colaboración para escalar a soluciones confiables. Consecuentemente, en 2017 se creó DendroRed (<https://dendrored.ujed.mx>) como una alianza estratégica para abordar esta problemática, que en lo individual llevarían más tiempo y recursos. Este mecanismo de colaboración ha investigado la perspectiva ofertada por la dendro y los drones ante los desafíos que enfrenta la gestión forestal. El objetivo de este trabajo es documentar las lecciones aprendidas, las áreas de oportunidad y posibles perspectivas de las dendrociencias y su vinculación con los drones para los bosques mexicanos. Se hipotetiza que la integración de estas herramientas aumenta significativamente el conocimiento de las interrelaciones ecológicas y constituye una oportunidad de mejorar la gestión y el manejo forestal.

Materiales y Métodos

A partir de una revisión documental de las experiencias publicadas con rigor científico indizadas en Researcher ID: F-9544-2019 (<https://www.webofscience.com/>), se seleccionaron resultados relevantes a la pregunta de investigación de la sección anterior.

Para los procedimientos dendroecológicos que explican la relación crecimiento-clima, se seleccionó un amplio gradiente biogeográfico y biológico a lo largo del territorio mexicano, con 15 especies de coníferas contemporáneas de importancia comercial y ecológica (Pompa-García *et al.* 2022; Cuadro 1). A partir de procedimientos dendrocronológicos estándar (Holmes, 1983; Bunn, 2008), se construyeron cronologías de ancho madera temprana para *Pinus jeffreyi* (Pje); *Pinus cembroides subsp. lagunae* (Pce); *Pinus caribaea var. hondurensis* (Pca); *Pinus oocarpa* en Veracruz (Poo); *Pinus oocarpa* en Chiapas (Poi); *Pinus engelmannii* (Pen); *Picea martinezii* (Pma); *Pinus patula* (Ppa); *Pinus maximartinezii* (Pmx); *Pinus johannis* (Pjo); *Pinus hartwegii* (Pha); *Abies hickelii* (Ahi); *Abies religiosa* en Querétaro (Are); *Abies religiosa* en el Estado de México (Arm) y *Juniperus deppeana* (Jde). Así mismo, para *Cupressus lusitanica* y *Pseudotsuga menziesii* se generaron series de densitometría y carbono (González-Cásares *et al.* 2019). Estas series de tiempo fueron correlacionadas con datos climáticos

Cuadro 1. Localización de los sitios de muestreo.

Especie	Código	Coordenadas geográficas O	Coordenadas geográficas N	Elevación (msnm)
Cronologías de Madera Temprana				
<i>Pinus caribaea</i> var. <i>hondurensis</i> Barret & Golfari.	Pca	-88.959678	18.245809	138
<i>Pinus oocarpa</i> Schiede ex Schltld.	Poo	-94.858753	18.275057	713
<i>Pinus oocarpa</i> Schiede ex Schltld.	Poi	-92.906313	16.834797	1096
<i>Pinus jeffreyi</i> Grev. & Balf.	Pje	-115.896584	31.891461	1540
<i>Pinus cembroides</i> subsp. <i>Lagunae</i> (Rob. Pass.) D.K. Bailey.	Pce	-109.997526	23.549553	1897
<i>Pinus engelmannii</i> Carr.	Pen	-107.116701	27.129415	2041
<i>Picea martinzii</i> T.F. Patterson.	Pma	-100.124847	25.176491	2205
<i>Pinus maximartinezii</i> Rzedowski.	Pmx	-103.231575	21.349183	2296
<i>Pinus patula</i> Schltld. et Cham.	Ppa	-99.453029	23.888600	2602
<i>Pinus johannis</i> M.-F. Robert-Passini.	Pjo	-101.460842	24.617240	2847
<i>Abies hickelii</i> Flous & Gausсен.	Ahi	-96.444405	17.380784	3044
<i>Juniperus deppeana</i> Steud.	Jde	-103.783284	23.678889	3078
<i>Abies religiosa</i> Kunth Schltld. et Cham.	Are	-100.179976	20.933830	3358
<i>Abies religiosa</i> Kunth Schltld. et Cham.	Arm	-98.754562	19.419169	3500
<i>Pinus hartwegii</i> Lindl.	Pha	-98.754514	19.419322	3504
Densitometría				
<i>Cupressus lusitanica</i> Mill.	Cul	-105.416667	23.691000	2561
<i>Pseudotsuga menziesii</i> (Mirb.) Franco	Psm	-105.422500	23.689723	2747
Xylogénesis				
<i>Pinus leophylla</i> Schiede Ex. Schltld. & Cham.	Ple	-105.200000	23.400000	2582
Vuelos VANT				
Plantación forestal		-107.111666	27.143333	2400
Bosque natural		-107.118753	27.128475	2413

de precipitación (PP) y temperatura máxima (Tmax) disponibles en el <https://climexp.knmi.nl/start.cgi> (Harris *et al.* 2020). Además, para *Pinus leophylla*, se investigó la formación de madera y su interdependencia de la producción de follaje a través del índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) (Pompa-García *et al.* 2021). Respecto a la inclusión de los VANT, la investigación se realizó en un par de áreas experimentales permanentes ubicadas en el norte de México. Estos sitios corresponden a una plantación forestal con fines de mejoramiento genético y un área de bosque mixto sometido a manejo forestal (Vivar-Vivar *et al.* 2022; Gallardo-Salazar y Pompa-García, 2020). A nivel de árbol individual fueron realizados procedimientos de fotogrametría digital para estimar número de árboles, área de copa, altura total e índices espectrales de vegetación.

Resultados

Los resultados de las diferentes investigaciones se muestran en las figuras 1 a la 5 y en el cuadro 1, donde se concentra el resumen de los sitios muestreados para la realización de las investigaciones. Se observa en la Figura 1 que la precipitación y la temperatura máxima afecta en

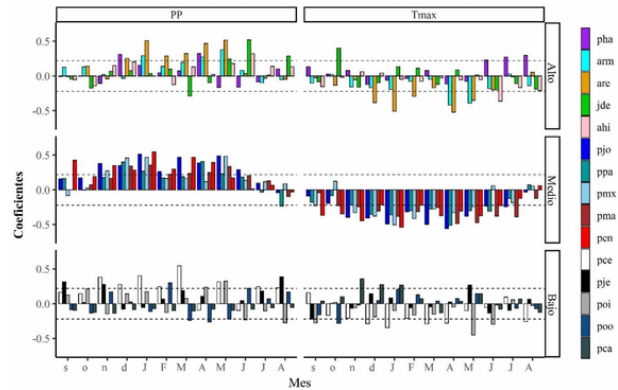


Figura 1. Asociaciones de crecimiento radial-clima por gradiente de elevación, mediante la correlación calculada para 15 coníferas mexicanas. Las correlaciones fueron calculadas desde el mes de septiembre anterior, hasta el mes agosto de la estación de crecimiento. Meses previos y actuales se denotan por la abreviación de minúsculas y mayúsculas respectivamente. Las líneas punteadas indican el nivel de significancia a 0.05. Las abreviaciones de las especies se explican en la sección de métodos.

altitudes medias (1900 a 3000 msnm). Así mismo, la madera temprana se ve afectada negativamente para especies de altitud media, así como favorecida por las buenas precipitaciones. Por otro lado, en la Figura 3 se observan los valores de densidad de la madera (máxima, media y mínima) para dos especies de coníferas, *Cupressus lusitanica* y *Pseudotsuga menziesii*. De igual manera, se observa en la Figura 4 las variaciones de carbono para el periodo de 1920 a 2019 de las dos especies.

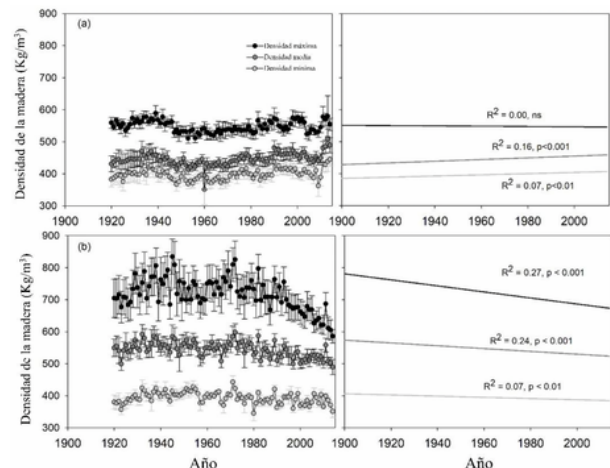


Figura 3. Valores medios de la densidad de la madera de *C. lusitanica* y *P. menziesii* mostrando valores de densidad mínima, media y alta para el periodo 1920-2014 (Tomado de González-Cásares *et al.* 2019; <https://doi.org/10.7717/peerj.7085>).

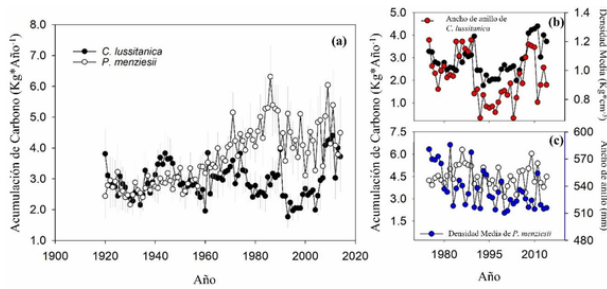


Figura 4. Variación temporal de carbono para *C. lusitanica* y *P. menziesii* por año. (a) relaciones entre acumulación de carbono y anillos de crecimiento para *C. lusitanica* y *P. menziesii* (b) y (c), respectivamente. (Tomado de González-Cásares et al. 2019; <https://doi.org/10.7717/peerj.7085>)

En la Figura 5 se observan las fases de la xilogenesis para *Pinus leiophylla*, resaltando los dos picos de crecimiento en la especie, lo que no se había documentado para nuestro país.

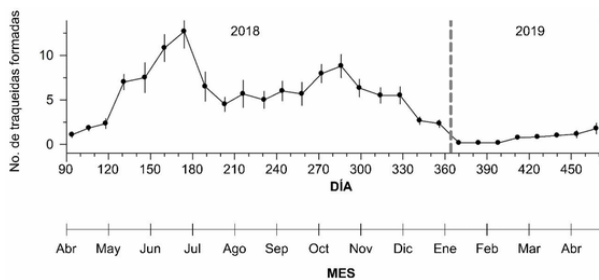


Figura 5. Fases de xilogenesis en *P. leiophylla* de acuerdo a la producción de traqueidas (modificado desde Pompa-García et al. 2021; <https://doi.org/10.1007/s00468-021-02102-1>).

Por último, en la Figura 6 se presentan los diferentes índices de vegetación calculados para la zona conocida como “El cordoncito”, en el estado de Guachochi, Chihuahua. Esta gran diversidad de índices resultaron complementarios para entender la dinámica del “verdor” a nivel de árbol individual.

Discusión

La complejidad de los ecosistemas forestales mexicanos otorga diferentes facetas del funcionamiento ecológico con su entorno de las especies estudiadas y que comparativamente son notables a nivel mundial (Gernandt y Pérez-de la Rosa, 2014). Los sitios estudiados constituyen un “laboratorio natural” ideal para afianzar la configuración y aplicabilidad de los resultados a través de un paquete tecnológico.

Los resultados de la Figura 1, muestran en términos

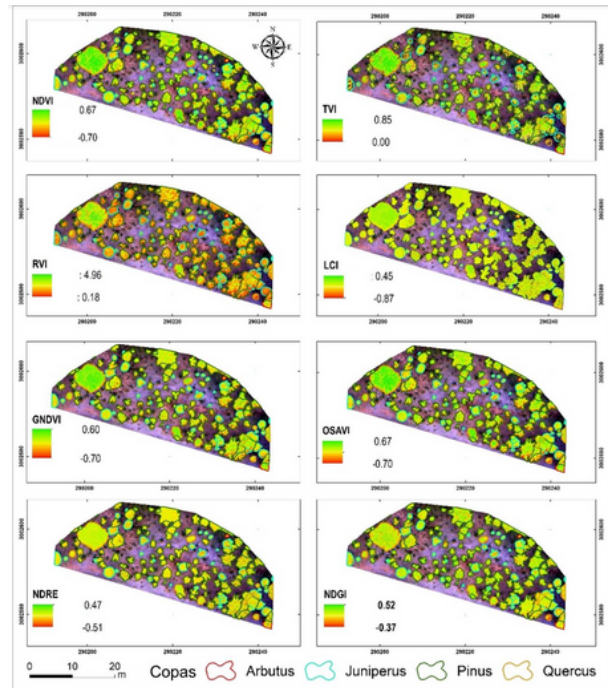


Figura 6. Índices de vegetación en el área de bosque natural ubicado en el norte de México. NDVI = índice de vegetación de diferencia normalizada, GNDVI = NDVI verde, LCI = índice de clorofila foliar, NDRE = índice de borde rojo de diferencia normalizada, OSAVI = índice de vegetación ajustado por suelo optimizado, RVI = índice de proporción de vegetación, TVI = índice de vegetación transformado, NDGI = índice de verdor de diferencia normalizado (Tomado de Vivar-Vivar et al. 2022; <https://doi.org/10.3390/rs14122775>).

generales que las coníferas estudiadas son reguladas por las condiciones previas del invierno. De esta forma, la conducta de la próxima estación de crecimiento radial de los pinos es una respuesta a la condición hidrológica ocurrida en los meses de noviembre a enero. Si los inviernos son secos y cálidos, el arbolado estará en estrés hídrico durante la primavera y el verano. Por el contrario, si la humedad y el frío persisten, el suelo guarda la humedad suficiente para reactivar el crecimiento gracias a la reactivación de la síntesis de carbohidratos al iniciar la estación de crecimiento (Fan et al. 2008).

Es destacable también que la respuesta climática es regulada siguiendo un gradiente elevacional. En la Figura 2, es evidente que los bosques de mediana altitud (1200 a 1600 msnm) son más susceptibles a la sequía. Ha sido especulado que la demanda evapotranspirativa es el estresor principal (Tumajer et al. 2022), sin descuidar las características específicas del sitio. Estos resultados son relevantes porque los bosques de elevación intermedia corresponden al 22% del territorio

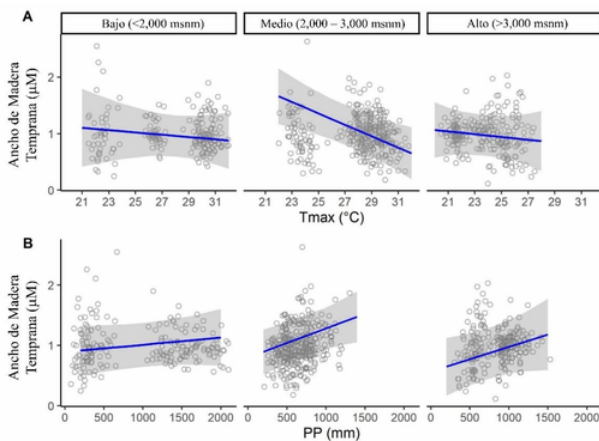


Figura 2. Ancho de madera temprana explicada por la temperatura máxima (A) y la precipitación total (B) a diferentes rangos elevacionales. Para cronologías representativas del territorio mexicano. Los puntos grises indican los datos observados, mientras que las líneas azules y región sombreada representan los valores predichos al 95% de confianza.

nacional en sierras templadas y 30% a los desiertos de Norteamérica.

Los resultados de densitometría demostraron que la inclusión de la densidad intranual ayuda a lograr más resultados precisos y abre la ruta hacia nuevos estudios (Fig. 3), especialmente a aquellos de la dinámica de carbono en bosques (Chave *et al.* 2004). Los resultados mostraron que la acumulación anual de carbón en *C. lusitánica* se ha asoció a las temperaturas del verano de la estación de crecimiento, mientras que *P. menziesii* se correlaciona con las lluvias invernales previo al crecimiento. Como se ha visto en Pompa-García y Venegas-González, (2016) las temperaturas máximas del verano son inversamente proporcionales a la densidad media. Ello se explica porque las altas temperaturas afectan el grosor celular de las traqueidas, mientras que la precipitación favorece el crecimiento de la madera temprana y reduce la densidad de la madera. En suma, las especies difieren en las tasas de acumulación de carbono (Fig. 4), lo que se atribuye a sus respuestas climáticas interespecíficas y posiblemente a su ontogenia. Es claro que la densidad máxima detecta mejor los signos climáticos, en comparación con los anillos de crecimiento. Su aplicación en modelos alométricos permite por tanto reconstruir almacenes de carbono y relación con datos climáticos (Pompa-García *et al.* 2018).

La investigación sobre la formación de madera derivó en el hallazgo de dinámica bimodal temporal en formación de madera no documentada anteriormente.

P. leiophylla tiene un mayor “pico” de producción de traqueidas en junio como se hipotetizaba, pero en octubre aparece un “pico” secundario. Esta bimodalidad sugiere una respuesta directa a las lluvias monzónicas como estrategia de plasticidad ante sequía (Pompa-García *et al.* 2021).

En el ámbito del conocimiento generado por los VANT, los resultados mostraron grandes capacidades predictivas en la altura del árbol (0.30 m de error estándar), y la delineación precisa de atributos de la copa, incluyendo la estimación de índices espectrales en ambos sitios estudiados. Sin embargo, el conteo del árbol tuvo las mejores bondades de ajuste en el área de las plantaciones. Estos algoritmos otorgan ventaja a la fotogrametría digital, aumentando la resolución temporal, espacial y espectral (Vivar-Vivar *et al.* 2022). De particular importancia resultaron la estimación de índices espectrales como proxies de actividad fotosintética en el dosel. No obstante, se requiere mayor investigación para complementar los hallazgos encontrados, incluyendo la factibilidad económica de su aplicación operativa en inventarios forestales.

Conclusiones

Mejorar la resolución espacial, temporal y espectral refina el conocimiento del monitoreo forestal, así como de los procesos ecológicos que están enfrentando los bosques. Los estudios a través de anillos de crecimiento son útiles y pueden complementar la información en los esfuerzos por entender el efecto de la variación hidroclimática en los árboles. En términos de la inclusión de la tecnología VANT presenta varias ventajas en términos de tiempo, respecto a los procedimientos en campo. Las métricas logradas son de alta precisión, particularmente en arbolado con arreglo espacial regular. Los índices espectrales dan cuenta de la actividad fotosintética, pero es necesario mayor tecnología e investigación al respecto, particularmente en masas con alta densidad de copas. La conjunción de datos de anillos de crecimiento y aquellos obtenidos por VANT, pueden configurarse en un paquete tecnológico para el monitoreo forestal. No obstante, es necesario ajustar las nuevas políticas de monitoreo que tome en cuenta estas tecnologías innovadoras y

amigables con el ambiente. El papel de las instituciones de investigación resulta crucial para vincular este conocimiento con los usuarios.

Agradecimientos

A todos las personas e instituciones que contribuyen de una u otra forma a acrecentar el acervo científico de DendroRed. Se reconoce el financiamiento de CONACYT-A1-S-21471.

Literatura citada

- Acosta-Hernández, A. C., Pompa-García, M. y 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. <https://doi.org/10.3390/f8050160>
- Altman, J., Doležal, J., Černý, T. y Song, J. S. (2013). Forest response to increasing typhoon activity on the Korean peninsula: evidence from oak tree-rings. *Global Change Biology*, 19(2), 498-504. <https://doi.org/10.1111/gcb.12067>
- Bunn, A. G. A. (2008). Dendrochronology Program Library in R (DplR). *Dendrochronologia*, 26(2), 115–124. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2008.01.002>
- Chave, J., Condit, R., Aguilar, S., Hernandez, A., Lao, S. y Perez, R. (2004). Error propagation and scaling for tropical forest biomass estimates. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 359(1443) 409–420. <https://doi.org/10.1098/rstb.2003.1425>
- Cuny, H. E. y Rathgeber, C. B. (2016). Xylogenesis: coniferous trees of temperate forests are listening to the climate tale during the growing season but only remember the last words! *Plant Physiology*, 171(1), 306-317. <https://doi.org/10.1104/pp.16.00037>
- De Micco, V., Carrer, M., Rathgeber, C. B. K., Camarero, J. J., Voltas, J., Cherubini, P. y Battipaglia, G. (2019). From xylogenesis to tree rings: wood traits to investigate tree response to environmental changes. *IAWA Journal*, 40(2), 155-182. <https://doi.org/10.1163/22941932-40190246>
- Domínguez, J. (2016). Revisión histórica de las sequías en México: de la explicación divina a la incorporación de la ciencia. *Tecnología y ciencias del agua*, 7(5), 77-93.
- Fan, Z. X., Bräuning, A. y Cao, K. F. (2008). Annual temperature reconstruction in the central Hengduan Mountains, China, as deduced from tree rings. *Dendrochronologia*, 26(2), 97-107. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2008.01.003>
- Fritts, H. (2012). Tree rings and climate. *Elsevier*, 582 pp.
- Gallardo-Salazar, J. L. y Pompa-García, M., (2020). Detecting Individual Tree Attributes and Multispectral Indices Using Unmanned Aerial Vehicles: Applications in a Pine Clonal Orchard. *Remote Sensing*, 12(24), 4144. <https://doi.org/10.3390/rs12244144>
- Gallardo-Salazar, J. L., Pompa-García, M., Aguirre-Salado, C. A., López-Serrano, P. M. y Meléndez-Soto, A. (2020). Drones: tecnología con futuro promisorio en la gestión forestal. *Revista mexicana de ciencias forestales*, 11(61), 27-50.
- Gernandt, D. S. y Pérez-de la Rosa, J. A. (2014). Biodiversidad de Pinophyta (Coníferas) En México. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 85, 126–133. <https://doi.org/10.7550/rmb.32195>
- González-Cásares, M., Pompa-García, M., Venegas-González, A., Domínguez-Calleros, P., Hernández-Díaz, J., Carrillo-Parra, A. y González-Tagle, M. (2019). Hydroclimatic variations reveal differences in carbon capture in two sympatric conifers in northern Mexico. *PeerJ* 7: e7085 <http://doi.org/10.7717/peerj.7085>
- Harris, I., Osborn, T. J., Jones, P. y Lister, D. (2020) Version 4 of the CRU TS Monthly High-Resolution Gridded Multivariate Climate Dataset. *Scientific Data*, 7, 109. <https://doi.org/10.1038/s41597-020-0453-3>
- Holmes, R. L. (1983). Computer assisted quality control. *Tree Ring Bull.* 43, 69–78.
- Kames, S., Tardif, J. C. y Bergeron, Y. (2011). Anomalous earlywood vessel lumen area in black ash (*Fraxinus nigra* Marsh.) tree rings as a potential indicator of forest fires. *Dendrochronologia*, 29(2), 109-114. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2009.10.004>
- Li, J., Chen, F., Cook, E. R., Gou, X. y Zhang, Y. (2007). Drought reconstruction for north central China from tree rings: the value of the Palmer drought severity index. *International Journal of Climatology*, 27(7), 903-909. <https://doi.org/10.1002/joc.1450>
- Pompa-García, M., Camarero, J. J., Colangelo, M. y Gallardo-Salazar, J. L. (2021). Xylogenesis is uncoupled from forest productivity. *Trees*, 35, 1123–1134 <https://doi.org/10.1007/s00468-021-02102-1>

- Pompa-García, M. y 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. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0156782>
- Pompa-García, M., Venegas-González, A., Junior, A. A. y 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. <https://doi.org/10.3959/1536-1098-74.2.196>
- Pompa-García, M., Vivar-Vivar, E. D., Sigala-Rodríguez, J. A. y Padilla-Martínez, J. R. (2022). What Are Contemporary Mexican Conifers Telling Us? A Perspective Offered from Tree Rings Linked to Climate and the NDVI along a Spatial Gradient. *Remote Sensing*, 14(18), 4506. <https://doi.org/10.3390/rs14184506>
- Tumajer, J., Scharnweber, T., Smiljanic, M. y Wilmking, M. (2022). Limitation by vapour pressure deficit shapes different intra-annual growth patterns of diffuse- and ring-porous temperate broadleaves. *New Phytologist*, 233(6), 2429-2441. <https://doi.org/10.1111/nph.17952>
- Vivar-Vivar, E. D., Pompa-García, M., Martínez-Rivas, J. A. y Mora-Tembre, L. A. (2022). UAV-Based Characterization of Tree-Attributes and Multispectral Indices in an Uneven-Aged Mixed Conifer-Broadleaf Forest. *Remote Sensing*, 14(12), 2775. <https://doi.org/10.3390/rs14122775>