

OBSERVACIONES TERRESTRES DE LA FENOLOGÍA ARBÓREA MULTIESPECÍFICA: UNA FORMA DE COMPRENDER MEJOR LAS FECHAS DE TRANSICIÓN DE LAS FENOFASES BAJO ESTRÉS POR SEQUÍA

TERRESTRIAL OBSERVATIONS OF MULTISPECIFIC TREE PHENOLOGY: A WAY TO BETTER UNDERSTAND PHENOPHASE TRANSITION DATES UNDER DROUGHT STRESS

Acosta-Hernández, A.C., E.D. Vivar-Vivar, M. Pompa-García

OBSERVACIONES TERRESTRES DE LA FENOLOGÍA ARBÓREA MULTIESPECÍFICA: UNA FORMA DE
COMPRENDER MEJOR LAS FECHAS DE TRANSICIÓN DE LAS FENOFASES BAJO ESTRÉS POR SEQUÍA
TERRESTRIAL OBSERVATIONS OF MULTISPECIFIC TREE PHENOLOGY: A WAY TO BETTER
UNDERSTAND PHENOPHASE TRANSITION DATES UNDER DROUGHT STRESS



Observaciones terrestres de la fenología arbórea multispecífica: Una forma de comprender mejor las fechas de transición de las fenofases bajo estrés por sequía

Terrestrial observations of multispecific tree phenology: A way to better understand phenophase transition dates under drought stress

Andrea Cecilia Acosta-Hernández, Eduardo Daniel Vivar-Vivar, Marín Pompa-García

OBSERVACIONES TERRESTRES DE LA FENOLOGÍA ARBÓREA MULTISPECÍFICA: UNA FORMA DE COMPRENDER MEJOR LAS FECHAS DE TRANSICIÓN DE LAS FENOFASES BAJO ESTRÉS POR SEQUÍA

TERRESTRIAL OBSERVATIONS OF MULTISPECIFIC TREE PHENOLOGY: A WAY TO BETTER UNDERSTAND PHENOPHASE TRANSITION DATES UNDER DROUGHT STRESS

POLIBOTÁNICA


Instituto Politécnico Nacional

Núm. 61: 235-257. Enero 2026

DOI:
10.18387/polibotanica.61.14

Andrea Cecilia Acosta-Hernández <https://orcid.org/0000-0003-0097-2232>
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

Eduardo Daniel Vivar-Vivar <https://orcid.org/0000-0002-2052-0404>
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.
Programa Institucional de Doctorado en Ciencias Agropecuarias y Forestales, Universidad Juárez del Estado de Durango, Río Papaloapan y Blvd. Durango, s/n, Col. Valle del Sur, Durango, Durango, 34120, México

Marín Pompa-García / mpgarcia@ujed.mx 
<https://orcid.org/0000-0001-7156-432X>
Laboratorio de Dendroecología, Facultad de Ciencias Forestales y Ambientales, Universidad Juárez del Estado de Durango
Programa Institucional de Doctorado en Ciencias Agropecuarias y Forestales, Universidad Juárez del Estado de Durango, Río Papaloapan y Blvd. Durango, s/n, Col. Valle del Sur, Durango, Durango, 34120, México

RESUMEN: Los ecosistemas forestales están modificando su fenología como consecuencia de las variaciones en el clima. Los bosques mixtos han sido considerados estratégicos para lidiar con el cambio climático, por lo que conocer sus procesos fenológicos contribuye a generar información útil para anticipar cambios en la composición de especies ante el calentamiento global. En este estudio describimos mensualmente a lo largo de un año las fenofases de cinco especies coexistentes en un bosque mixto, en una región del norte de México altamente diversa pero susceptible a la sequía. Encontramos diversas fenofases entre coníferas y latifoliadas, comprendidas en reposo, caída de hojas, desarrollo de yemas, elongación del follaje y formación y crecimiento de órganos reproductivos, con sus diferencias temporales entre ellas. La especie *Pinus engelmannii*, tuvo el inicio más temprano de sus fenofases, mientras que *Arbutus bicolor* presentó un inicio tardío, así como una menor duración en sus fenofases con respecto a las otras especies estudiadas. La mayor duración en tiempo en las diferentes fenofases se presentó en *Juniperus deppeana* mientras que *Arbutus bicolor* tuvo periodos más cortos. Aunque se requieren más datos complementarios de clima, así como de acortar la periodicidad de los muestreos, nuestros resultados se interpretan como respuestas a mecanismos fisiológicos que presentan las especies como estrategias de respuesta ante el entorno. Dada la limitación de la temporalidad y el esfuerzo operativo, los resultados no son del todo concluyentes sin embargo constituyen una base esencial para continuar el monitoreo y potenciar el entendimiento de la fenología en los bosques mixtos de cara a los escenarios de sequía pronosticada. **Palabras clave:** Fenología; bosques mixtos; *Pinus*; *Quercus*; *Juniperus*; *Arbutus*.

ABSTRACT: Forest ecosystems are modifying their phenology as a consequence of climate variability. Mixed forests have been considered strategic to cope with climate change, so knowing their phenological processes contributes to generate useful information to anticipate changes in species composition in the face of global warming. In this study, we describe the phenophases of five coexisting species in a mixed forest in a highly diverse but drought-susceptible region of northern Mexico on a monthly basis over the course of a year. We found several phenophases among conifers and broadleaved trees, including resting, leaf fall, bud development, foliage elongation, and formation and growth of reproductive organs, with their temporal differences among them. The species *Pinus engelmannii* had the earliest onset of its phenophases, while *Arbutus bicolor* had a late onset and shorter phenophases than the other species studied. The longest duration of the different phenophases was observed in *Juniperus deppeana*, while *Arbutus bicolor* had shorter periods. Although more complementary climate data are required, as well as shortening the periodicity of sampling, our results are interpreted as responses to physiological mechanisms presented by the species as strategies to respond to the environment. Given the limitation of time and operational labor, the results are not entirely conclusive, however they constitute an essential basis for further monitoring and to enhance the understanding of phenology in mixed forests in the face of predicted drought scenarios.

Key words: Phenology; mixed forests; *Pinus*; *Quercus*; *Juniperus*; *Arbutus*.

INTRODUCCIÓN

Las modificaciones en el clima están alterando los ecosistemas forestales en el mundo; los cambios en las temperaturas, las variaciones en los patrones de precipitación, el aumento en la ocurrencia de eventos climáticos extremos como sequías y la presencia de incendios, están alterando los regímenes ecológicos (Anderegg *et al.*, 2020; Keenan, 2015). Estos eventos causan una disminución en la productividad forestal lo que puede desencadenar cambios en la composición de especies favoreciendo los procesos de degradación de los ecosistemas (Allen *et al.*, 2015; Molina-Marchan *et al.*, 2024; Morin *et al.*, 2018). A su vez, estas alteraciones disminuyen la capacidad de los bosques para actuar como sumideros de carbono, propiciando el desplazamiento altitudinal y latitudinal de especies en respuesta a nuevas condiciones climáticas (Pecl *et al.*, 2017; Sáenz-Romero *et al.*, 2016). Estos eventos provocan alteraciones en los patrones fenológicos de las especies forestales (Piao *et al.*, 2019), desencadenando una asincronía entre las poblaciones naturales y el clima para el cual están adaptadas afectando la competitividad entre especies, favoreciendo a aquellas con mayor plasticidad fenológica (Vitasse *et al.*, 2018). El monitoreo de la vegetación es una herramienta clave para comprender los cambios ecológicos a nivel local y global (Pettorelli *et al.*, 2016). Entre las técnicas de monitoreo más valiosas destaca la fenología. La fenología al ser la ciencia que se basa en el estudio de los eventos periódicos que ocurren dentro del ciclo de vida de los seres vivos permite registrar eventos biológicos recurrentes conocidos como fenofases y vincularlos con variables climáticas (Cleland *et al.*, 2007; Tang *et al.*, 2016). Este enfoque ofrece respuestas a los efectos del cambio climático sobre los ecosistemas forestales, ya que incluso ligeras variaciones en temperatura o precipitación pueden modificar los ciclos fenológicos (Gray & Ewers, 2021).

El monitoreo fenológico en los bosques mixtos ayuda a identificar los cambios presentes en su comportamiento. Estos bosques resultan idóneos ya que se caracterizan por una alta diversidad de especies y una marcada estacionalidad; son especialmente sensibles a variaciones en temperatura y precipitación, lo que afecta la temporalidad de las fenofases (Delpierre *et al.*, 2016; Gray & Ewers, 2021). La observación fenológica permite identificar patrones de adaptación o estrés, ayudando a predecir cambios en la productividad, la regeneración natural y las interacciones ecológicas (Duputié *et al.*, 2015; Pezzini *et al.*, 2014). Además, la información fenológica es esencial para establecer periodos críticos para la conservación de especies sensibles, como las polinizadoras o dispersoras de semillas, cuyas dinámicas pueden verse alteradas por desajustes fenológicos (Flores *et al.*, 2023; Morellato *et al.*, 2016). Dado que los bosques de pino-

encino cumplen funciones clave como la captación de agua, la protección del suelo y el almacenamiento de carbono (Felipe-Lucia *et al.*, 2018), integrar el monitoreo fenológico en su manejo es clave para su conservación a largo plazo.

En este sentido, las coníferas se distinguen por mantener una actividad fisiológica constante a lo largo del año, mostrando una menor dependencia de los cambios estacionales en comparación con las latifoliadas (Rossi *et al.*, 2016). Estas especies, han desarrollado adaptaciones que les permiten conservar agua, resistir bajas temperaturas y mantener la fotosíntesis incluso en condiciones climáticas adversas (Rossi *et al.*, 2016). Por otro lado, las latifoliadas se caracterizan por patrones estacionales marcados que ocurren en respuesta a los cambios en el clima y el ambiente (Körner & Basler, 2010). Estas especies de árboles de hojas anchas suelen presentar un ciclo anual que inicia en primavera y termina en invierno (Silvestro *et al.*, 2025). Este ciclo les permite optimizar los recursos (luz solar y agua), y sincronizarse con la actividad de polinizadores y dispersores, influyendo en su supervivencia y éxito reproductivo (Körner & Basler, 2010; Madrid-Aispuro *et al.*, 2025a).

El análisis de estos patrones fenológicos permite comprender las estrategias adaptativas de las especies frente a las variaciones ambientales, proporcionando el marco necesario para evaluar sus similitudes y/o diferencias dentro del ecosistema. Consecuentemente, el objetivo del presente trabajo fue identificar y describir las fases fenológicas de cinco especies dentro de un bosque de pino-encino de la Sierra Madre Occidental. La hipótesis a probar es que las cinco especies que coexisten en el bosque de pino-encino de la Sierra Madre Occidental presentan fases fenológicas asincrónicas y diferenciadas entre ellas, potencialmente determinadas por sus respuestas ecológicas al entorno.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

El área de estudio seleccionada corresponde a un sitio donde convergen ocho especies arbóreas, conocido como Mesa de Pawiranachi, ubicado dentro del municipio de Guachochi, Chihuahua en la Sierra Madre Occidental (Pompa-García *et al.*, 2025), dentro de las coordenadas centrales 107.1114 O y 27.1492 N, a una altitud de 2400 msnm (Figura 1). Este sitio presenta una alta diversidad de especies, el terreno se caracteriza por una pendiente menor del 5% y un clima templado de estacionalidad marcada la cual ha sido documentada en estudios previos (Acosta-Hernández *et al.*, 2024; Silva-Ávila *et al.*, 2025). La vegetación se conforma por bosques jóvenes que incluyen especies de los géneros *Pinus*, *Juniperus*, *Quercus* y *Arbutus* dentro del estrado arbóreo y dentro del estrato herbáceo se encuentran especies de los géneros *Cologania*, *Cyperus*, *Desmodium*, *Trifolium*, *Sporobolus*, *Zuloagaea*, *Eleusine* y *Bouteloua* (Pompa-García *et al.*, 2024). Las especies arbóreas muestreadas fueron *Arbutus bicolor* S. González, M. González & P.D. Sørensen, *Juniperus deppeana* Steud., *Pinus engelmannii* Carrière, *Quercus durifolia* Seemen y *Quercus grisea* Liebm.

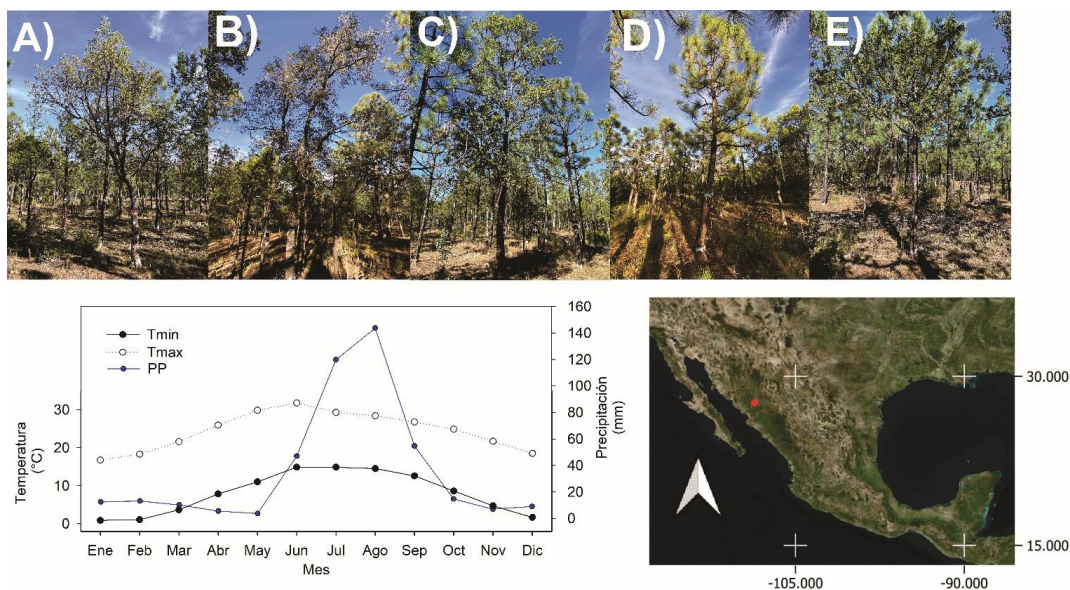


Figura 1. Localización del área de estudio, climograma y especies muestreadas: a) *A. bicolor*, b) *Q. durifolia*, c) *Q. grisea*, d) *P. engelmannii* y e) *J. deppeana*.

Figure 1. Location of the study area, climogram and sampled species: a) *A. bicolor*, b) *Q. durifolia*, c) *Q. grisea*, d) *P. engelmannii* y e) *J. deppeana*.

Muestreo de fenofases

Se muestrearon cinco individuos por especie de acuerdo a lo recomendado por Benavidez et al., (2023), seleccionando árboles bien conformados, sin daños aparentes, y cuyas características dasométricas se mencionan en la Tabla 1. Por un periodo de un año se tomaron fotografías mensuales de una misma ramilla, el periodo abarcó de noviembre de 2023 a octubre de 2024 procurando cubrir el ciclo fenológico anual. Con el fin de tener uniformidad en las fotografías tomadas, se realizaron en la misma dirección y hora del día, buscando preferentemente su exposición al sol. Las fases fenológicas registradas fueron: a) fructificación, b) formación y crecimiento de órganos reproductivos, c) reposo o dormancia, d) caída de hojas, e) desarrollo de yemas apicales y axilares y f) elongación del follaje.

Tabla 1. Características dasométricas de los árboles muestreados.

Table 1. Dasometric characteristics of the sampled trees.

Especie	DN	Sd de DN	AT	Sd de AT
<i>Arbutus bicolor</i>	14.20	4.80	5.70	1.30
<i>Juniperus deppeana</i>	9.86	1.89	4.27	0.27
<i>Pinus engelmannii</i>	23.20	5.18	10.14	1.92
<i>Quercus durifolia</i>	26.12	5.19	11.65	1.20
<i>Quercus grisea</i>	14.20	7.26	7.87	2.92

DN = diámetro a la altura del pecho; AT = altura total y Sd = desviación estándar.

RESULTADOS

Las especies muestreadas presentaron comportamientos diferenciados en cuando a sus fases fenológicas (Figura 2). Dentro de las coníferas que comprenden a *P. engelmannii* y *J. deppeana* no fue posible documentar la fase de fructificación, atribuible a que presenta años semilleros, mientras que, en las latifoliadas como *A. bicolor*, *Q. durifolia* y *Q. grisea* la fase de formación y crecimiento de órganos reproductivos no se pudo observar dentro del muestreo realizado.

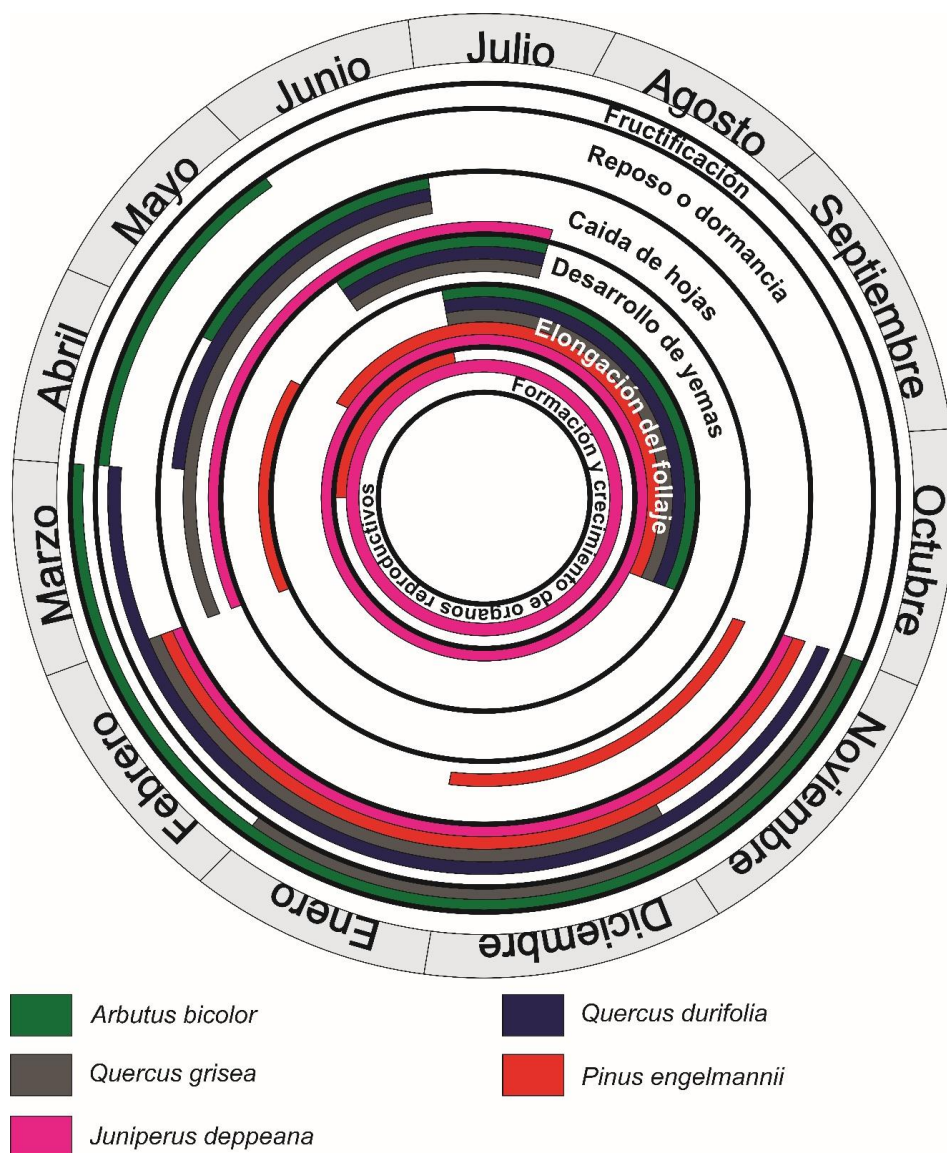


Figura 2. Calendario de fases fenológicas por especies muestreadas.
Figure 2. Phenological phase calendar by sampled species.

Descripción de fases fenológicas por especie

Arbutus bicolor S. González, M. González & P.D. Sørensen

Al inicio del muestreo se pudo identificar a la especie *A. bicolor* dentro de la fase fructificación. En esta fase se encontró el fruto (baya) en algunos de los árboles en proceso de maduración

presentando una coloración de amarillo a naranja con textura rugosa y en otros árboles el fruto en estado maduro, con una tonalidad rojo intenso. Para el caso de las bayas maduras estas se encontraron sobre ramillas exfoliadas, con corteza interna lisa de color rojizo mientras que las que se encontraron en proceso de maduración presentó tonalidad café. Esta coloración la hace atractiva para los animales dispersores, indicando la baya lista para su esparcimiento. El cambio de color es la característica más notoria ligada a la maduración, la transformación más importante es la degradación del color la cual está asociada con la síntesis o desmascaramiento de pigmentos cuyos colores oscilan entre el amarillo (carotenoides) y el rojo-morado (antocianinas). Este proceso permitió a la baya seguir desarrollándose hasta alcanzar su tamaño final en noviembre, destinando los nutrientes almacenados a los frutos para asegurar una buena maduración. En el periodo de diciembre a marzo se presentó la abscisión del fruto, proceso que se dio una vez que las bayas están completamente maduras. Durante este periodo el árbol fue desprendiéndose gradualmente de los frutos. En estos meses se apreció un cambio de tonalidad en las bayas pasando de un color rojo brillante a amarillo o naranja, perdiendo humedad (Figura 3A y B).

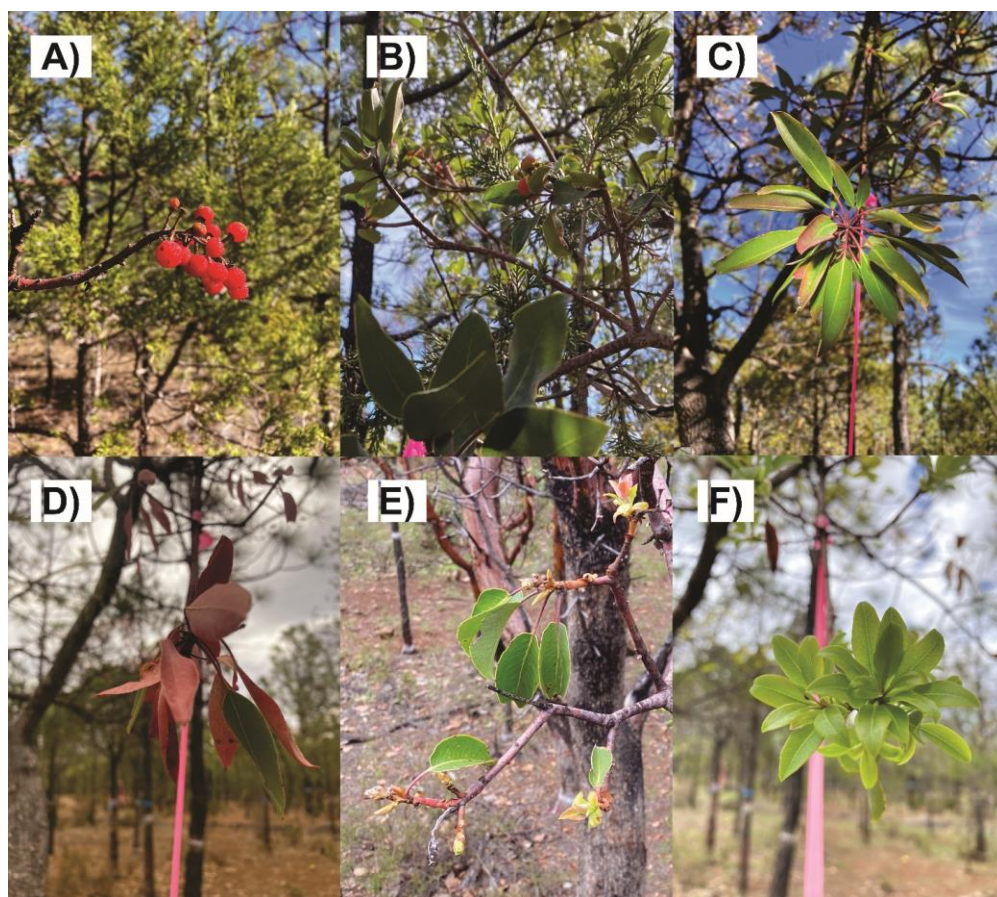


Figura 3. Desarrollo fenológico de *Arbutus bicolor*. A) y B) Fase de fructificación, baya en estado maduro y en proceso de maduración, C) Ramilla en estado de reposo, D) Fase de caída de hojas, E) Desarrollo de yemas y E) Elongación del follaje

Figure 3. Phenological development of *Arbutus bicolor*. A) and B) Fruiting phase, berry in its ripe state and in the process of maturation, C) Twig in its resting state, D) Leaf fall phase, E) Bud development and E) Foliage elongation.

En los meses de abril a mayo se presentó la fase de reposo o dormancia, apreciando la disminución en su actividad metabólica significativa (Figura 3C). A principios del mes de mayo se pudo observar que el árbol entro en la fase de caída de hojas conservando unas cuantas al final de la fase, no realizando un crecimiento activo. La coloración de las hojas durante este proceso pasó de un verde intenso en abril a un café o amarillo a lo largo de los meses (Figura 3D).

Con la caída de las primeras lluvias producto de la temporada de verano, la especie entró en un crecimiento activo de sus estructuras. Durante este periodo se presentó la fase de desarrollo de yemas apicales y axilares en las ramillas presentándose a partir del mes de junio (Figura 3E). Durante el mes de julio se presentó un crecimiento visible de desarrollo de hojas producto de las condiciones cálidas y una mayor precipitación estimulando su crecimiento, iniciando la fase de elongación de follaje la cual se prolongó hasta el mes de agosto el árbol continuó con la elongación de las hojas, adquiriendo su forma madura, cambiando de tonalidad a verde oscuro, aumentando su rugosidad en los meses subsecuentes (septiembre-octubre) (Figura 3F).

En el periodo estudiado no se evidencio la ocurrencia de inflorescencias. A pesar de que en el año 2023 se documentó la presencia de frutos para finales de año (noviembre) en el año subsecuente no fue posible vislumbrar dicha fase en los árboles muestreados lo que denota variaciones en los periodos de floración (Figura 4). El año 2023 en los meses previos a la fructificación (agosto-octubre) se caracterizó por presentar temperaturas más altas, mayores temperaturas mínimas y una mayor precipitación que las presentadas en el año 2024.



Figura 4. Fases fenológicas de *Arbutus bicolor*.
Figure 4. Phenological phases of *Arbutus bicolor*.

***Quercus durifolia* Seemen.**

Para esta especie al inicio del muestreo en noviembre, los árboles se encontraban en fase dormancia. Durante este periodo las hojas presentaron una tonalidad verde con secciones café, continuando así hasta el mes de febrero-marzo (Figura 5A, Figura 6).

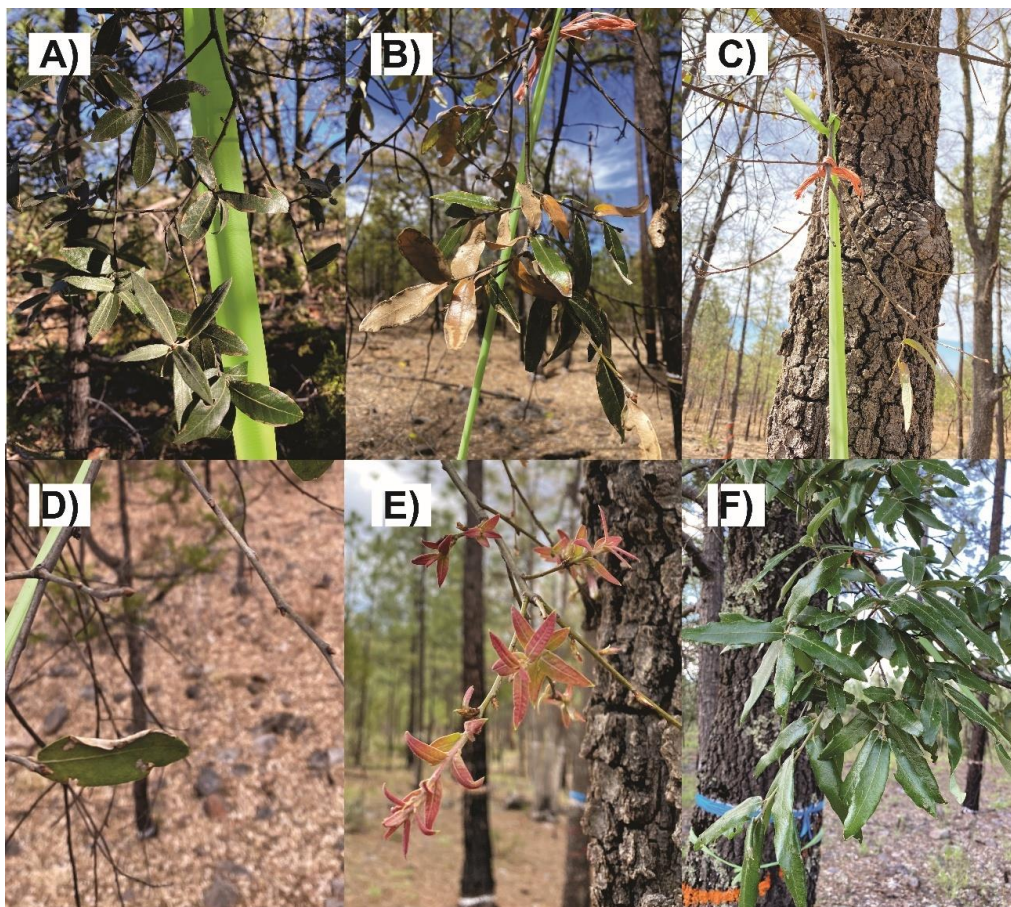


Figura 5. Desarrollo fenológico de *Quercus durifolia*. A) Ramilla en estado de reposo, B) y C) Fase de caída de hojas, D) Desarrollo de yemas, E) y F) Elongación del follaje.

Figure 5. Phenological development of *Quercus durifolia*. A) Twig in dormant state, B) and C) Leaf fall phase, D) Bud development, E) and F) Foliage elongation.

Asumiendo que, con el aumento de las temperaturas en el sitio y la ausencia de precipitación, el árbol entro en la fase de caída de hojas. La caída de hojas en los árboles muestreados se presentó en los meses de abril a junio, desarrollándose de manera gradual hasta obtener un desprendimiento total de las hojas en el mes de junio. Durante este periodo las hojas pasaron por las tonalidades verde, amarillo finalizando en café (Figura 5B y C, Figura 6).

En el mes de junio cuando usualmente llegan las lluvias, la especie inició su crecimiento vegetativo. Esta etapa se caracterizó por el desarrollo de las yemas axilares y apicales en las ramillas apreciando la aparición de nuevos brotes de hojas, que crecieron rápidamente en tonalidades rojizas siendo consistente en todos los árboles muestreados para el mes de julio (Figura 5D, Figura 6).

La fase de elongación de follaje se desarrolló a partir del mes de julio-agosto, proceso en el cual las hojas tuvieron un crecimiento acelerado hasta alcanzar su tamaño final extendiéndose hasta el mes de octubre. Dentro de este periodo las hojas pasaron de tonalidades rojizas a verde, alcanzando su tamaño máximo al final de periodo (Figura 5E y F, Figura 6).



Figura 6. Fases fenológicas de *Quercus durifolia*.
Figure 6. Phenological phases of *Quercus durifolia*.

***Quercus grisea* Liebm.**

Al inicio del muestreo fenológico en noviembre, la especie se encontraba en la fase de fructificación, por lo cual se puede observar el desarrollo de bellotas. Las bellotas encontradas presentaron forma ovoide o cilíndrica de tonalidades verde y café. A lo largo de los meses las bellotas continuaron creciendo hasta alcanzar su tamaño definitivo y madurez. La caída de bellotas marca el final del proceso de fructificación, presentándose en los meses de diciembre a enero, después de su oscurecimiento y engrosamiento de pared (Figura 7A y B, Figura 8).

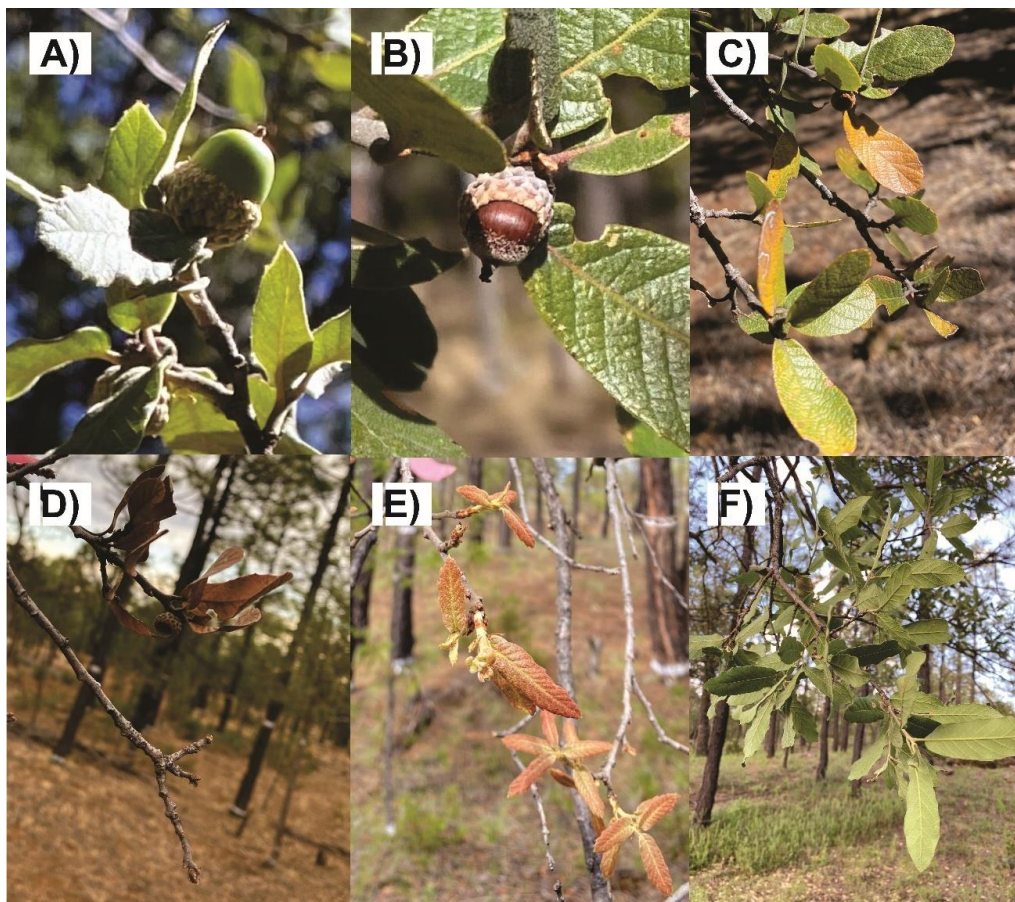


Figura 7. Desarrollo fenológico de *Quercus grisea*. A) y B) Fase de fructificación, baya en proceso de maduración y baya en estado maduro, C) Fase de caída de hojas, D) Desarrollo de yemas, E) y F) Elongación del follaje.

Figure 7. Phenological development of *Quercus grisea*. A) and B) Fruiting phase, berry in the process of ripening and berry in its ripe state, C) Leaf fall phase, D) Bud development, E) and F) Foliage elongation.

Posteriormente el árbol entro en la fase de reposo en los meses de diciembre a febrero. Para el periodo de marzo a mayo los árboles entraron en la fase de caída de hojas. Dentro de este periodo se presentó un cambio de coloración pasando de un verde a amarillo-café. En los árboles donde no se desarrollaron bellotas este proceso se recorrió de mayo a junio (Figura 7C, Figura 8).

En el mes de junio, los árboles reactivaron su crecimiento, entrando en la fase de desarrollo de yemas apicales y axilares que se caracterizó por un crecimiento continuo del árbol. Durante este periodo las yemas axilares y apicales se desarrollaron dando lugar al crecimiento de nuevos brotes a partir de julio. Posterior a ello el árbol entro en la fase de elongación de follaje, en el cual las primeras hojas presentaron una coloración rojiza y continuaron su crecimiento hasta alcanzar un mayor tamaño y coloración verde en el transcurso del mes de agosto llegando a su madurez en septiembre-octubre (Figura 7E, Figura 8).



Figura 8. Fases fenológicas de *Quercus grisea*.
Figure 8. Phenological phases of *Quercus grisea*.

***Pinus engelmannii* Carrière**

Al inicio del muestreo en el mes de noviembre se identificó a la especie en la fase de caída de hojas, desprendiéndose de las acículas más viejas. En este mes se presentó una mayor temperatura acompañado de un poco de precipitación y un bajo déficit de presión de vapor (Figura 9A).

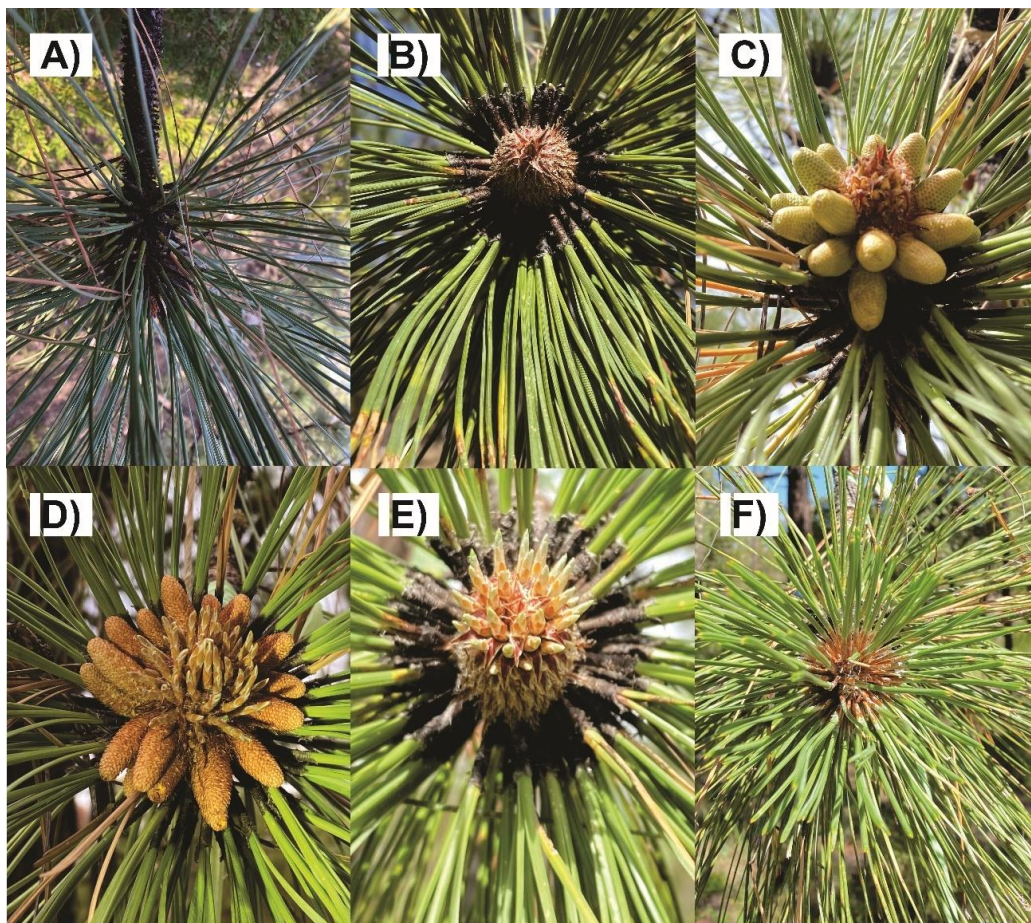


Figura 9. Desarrollo fenológico de *Pinus engelmannii*. A) Fase de caída de hojas, B) Fase de desarrollo de yemas, C) y D) Fase de formación y crecimiento de los órganos reproductivos, E) y F) Fase de elongación del follaje.

Figure 9. Phenological development of *Pinus engelmannii*. A) Leaf fall phase, B) Bud development phase, C) and D) Reproductive organ formation and growth phase, E) and F) Foliage elongation phase.

A partir de noviembre-diciembre se aprecia que el árbol entró en la fase de reposo, la cual se extendió a lo largo del invierno hasta el mes de febrero. Durante esta temporada no se produjo un cambio notorio en la coloración y/o crecimiento de las acículas.

En el mes de marzo cuando se supone aumentan las temperaturas y el fotoperíodo, los árboles comenzaron su crecimiento vegetativo. Durante este mes el árbol entró en la fase de desarrollo de yemas apicales y axilares, se aprecia un notorio crecimiento en las yemas dando origen a nuevas acículas dentro de las ramillas la cual continúa hasta los meses de marzo a abril (Figura 9B, Figura 10).

A finales del mes de abril se observó el inicio de la fase de formación y crecimiento de órganos reproductivos, con la presencia de los estróbilos masculinos o de polen. Para el mes de mayo se observaron los estróbilos en el ápice de las ramillas con color verde y de forma redondeada. En los meses subsiguientes se apreció su elongación acelerada y su cambio de tonalidad a color amarillo, producto de la liberación de los granos de polen para el mes de junio. El término de la fase se dio al terminar la liberación de polen, después de lo cual empezó el desprendimiento de los estróbilos (Figura 9C y D, Figura 10).

A partir del mes de mayo se presenta la fase de elongación de follaje, apareciendo nuevos brotes que comienzan a extenderse de la parte final hacia el exterior, lo que genera la aparición de nuevas ramas. A medida que la yema continúa alargándose, comienza a emerger un brote joven con las

primeras acículas para el mes de junio. Finalmente se observó el crecimiento de la copa del pino al alargarse las acículas anteriormente formadas, dando origen a acículas maduras y densas (Figura 9E y F, Figura 10).



Figura 10. Fases fenológicas de *Pinus engelmannii*.
Figure 10. Phenological phases of *Pinus engelmannii*.

***Juniperus deppeana* Steud.**

Al comienzo del muestreo en el mes de noviembre, se apreció a la especie en la fase de dormancia. En este periodo no se observó un crecimiento evidente de los árboles seleccionados, no descartando que esto ocurra en otros individuos.

A partir de marzo es posible apreciar un cambio en la tonalidad en algunas de sus hojas, tornándose de verde a tonos marrones indicando el inicio de la fase de caída de hojas. En algunos árboles esto no se presentó el mismo mes lo cual nos hace suponer que no es una fase tan marcada prolongándose en algunos casos hasta el mes de julio (Figura 11A).

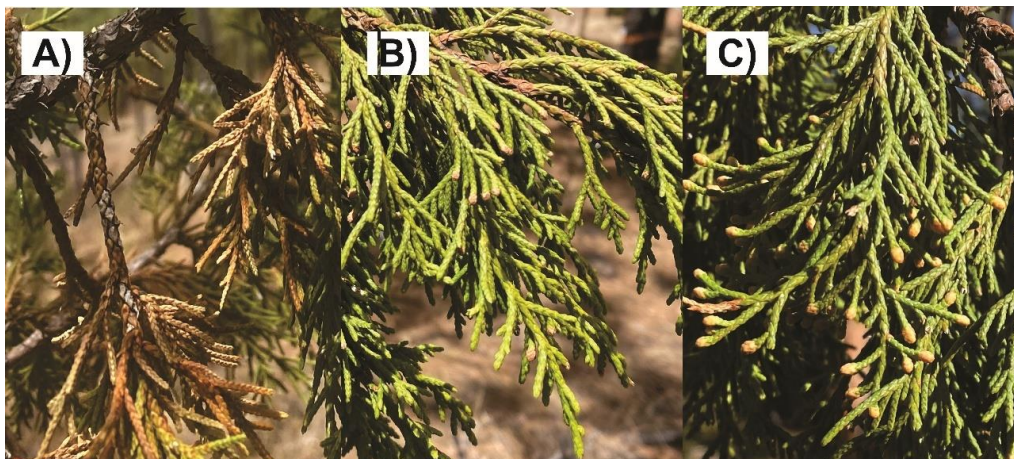


Figura 11. Desarrollo fenológico de *Juniperus deppeana*. A) Fase de caída de hojas, B) Fase de elongación del follaje, y C) Fase de formación y crecimiento de los órganos reproductivos.

Figure 11. Phenological development of *Juniperus deppeana*. A) Leaf fall phase, B) Foliage elongation phase and C) Reproductive organ formation and growth phase.

A lo largo del año se llevó a cabo un crecimiento vegetativo lento pero constante en la fase de elongación de follaje, produciendo durante esta fase sus hojas en forma de escamas. A partir del mes de enero es posible identificar hojas al inicio de forma acicular, rasgo que permite reducir la pérdida de agua. Posteriormente se observaron modificaciones hasta convertirse en escamas, anchas y cortas. A medida que crecen dentro de la ramilla es posible identificar los nuevos segmentos gracias a su tonalidad verde claro (Figura 11B).

Durante todo el año de muestreo fue posible identificar la presencia de hojas adulta con conos masculinos inmaduros, los cuales crecieron gradualmente lo cual hace suponer que esta especie tiene una temporalidad amplia dentro de la fase de formación y crecimiento de órganos reproductivos (Figura 11C). También, se identificó zonas secas en las puntas de algunas hojas producto de las condiciones ambientales del sitio. Este año no se observó la presencia de conos femeninos (Figura 12).



Figura 12. Fases fenológicas de *Juniperus deppeana*.
Figure 12. Phenological phases of *Juniperus deppeana*.

DISCUSIÓN

Este es uno de los primeros acercamientos a la fenología de todas las especies. Para *Arbutus bicolor*, la información disponible se centra en su taxonomía y morfología (González-Elizondo *et al.*, 2012a; González-Elizondo *et al.*, 2012b). Se han documentado aspectos relacionados con su floración y fructificación, en otras especies, encontrando variación en la temporalidad de las fases con relación al sitio de estudio. En un estudio realizado por Tovar-Rocha *et al.* (2017) para *Arbutus xalapensis* en Michoacán indicaron que la fase de fructificación se dio de mayo a junio presentándose de manera más temprana a lo reportado por el presente estudio. Estas diferencias en la temporalidad de las fenofases pueden estar influenciadas por variaciones en las condiciones ambientales de los sitios (Cleland, 2010).

Para el caso de *Quercus durifolia* la información disponible aborda el crecimiento, producción de planta en vivero, así como una descripción inicial de su fenología, encontrando ciertas similitudes en las fases reportadas (Madrid-Aispuro *et al.*, 2025a; Madrid-Aispuro *et al.*, 2025b). Dentro de la fase de caída de hojas está se presentó con el aumento de las temperaturas en el sitio

y la ausencia de precipitación, proceso que ayuda a reducir la pérdida de agua por transpiración (Janssen *et al.*, 2021). Durante la fase de elongación foliar, el crecimiento de las hojas está asociado con su actividad meristemática y a la expansión celular promovida por fitohormonas como las auxinas, giberelinas y citoquininas, las cuales regulan la división y el alargamiento de las células del mesófilo (Alcantara-Cortes *et al.*, 2019). En este periodo, la transición de tonalidades rojizas a verdes refleja un cambio fisiológico relevante: la disminución progresiva de antocianinas y el aumento en la síntesis de clorofilas, lo que marca el inicio de una mayor capacidad fotosintética (Taiz *et al.*, 2023). A medida que las hojas alcanzan su tamaño final, se completa la diferenciación de los tejidos fotosintéticos y se optimiza la eficiencia del aparato fotosintético, permitiendo una mayor asimilación de carbono y contribuyendo activamente al crecimiento y metabolismo de la planta (Taiz *et al.*, 2023). Para esta especie no se pudo observar la floración, polinización, el desarrollo de frutos y caída de bellotas dentro del muestreo realizado. La ausencia de eventos reproductivos observada durante el periodo de muestreo puede explicarse por las características fenológicas y fisiológicas propias del género *Quercus*. Diversas especies de encinos presentan una fructificación masiva intermitente o masting (Sork, 1993), fenómeno en el cual la producción de flores y frutos ocurre con periodicidad variable y depende de condiciones climáticas favorables, disponibilidad de recursos y señales hormonales internas (Koenig *et al.*, 2015). En años no reproductivos, los árboles suelen destinar la mayor parte de sus reservas energéticas al crecimiento vegetativo y a la formación de estructuras perennes, en lugar de invertir en procesos reproductivos costosos como la floración o el desarrollo de bellotas. En *Q. durifolia*, esta estrategia fisiológica permite optimizar el uso de recursos en ambientes estacionales o limitantes, asegurando una reproducción más eficiente en años subsecuentes con condiciones ambientales óptimas.

En *Q. grisea*, la información fenológica aborda únicamente la floración y maduración de sus frutos (Valencia-Ávalos *et al.*, 2020). La fase de fructificación solo pudo ser documentada para *Q. grisea*, lo cual puede deberse a la alta longevidad que presenta el género *Quercus*, que influye en el tiempo de su etapa reproductiva que se presenta en el intervalo de los 3 a 50 años. Sin embargo, el periodo de fructificación de *Q. grisea*, fue coincidente con lo reportado por Valencia-Ávalos *et al.* (2020) en un estudio realizado para diferentes especies de *Quercus* cuyo periodo de fructificación es de junio a diciembre el cual incluso puede extenderse hasta el año siguiente dependiendo de la especie. En la fase de fructificación, las variaciones en la coloración de las bellotas reflejan las diferentes etapas del proceso de maduración y acumulación de reservas. Durante esta fase, se produce el traslado y almacenamiento de compuestos orgánicos desde las hojas hacia los frutos, lo que permite el almacenamiento progresivo de almidones, lípidos y proteínas, esenciales para el desarrollo embrionario y la posterior germinación de la semilla (Bonner & Vozzo, 1987; Pulido & Díaz, 2005). La coloración verde inicial de las bellotas está asociada a la presencia de clorofilas activas, las cuales disminuyen conforme avanza la maduración y se acumulan taninos y compuestos fenólicos, responsables de los tonos pardos y grises característicos del fruto maduro (Espelta *et al.*, 2008). Este proceso fisiológico está fuertemente influido por factores abióticos como la temperatura y la humedad, así como por la disponibilidad de recursos que determinan la eficiencia en la síntesis y transporte de metabolitos hacia los frutos, afectando finalmente la viabilidad y éxito germinativo de las bellotas de *Q. grisea*.

Con respecto a *Pinus engelmannii* los estudios se han centrado principalmente en su desarrollo vegetativo, reproductivo y en la influencia de factores ambientales sobre su crecimiento y calidad de planta (García-Pérez *et al.*, 2015; Rodríguez-Laguna *et al.*, 2000). Los resultados de inicio de crecimiento vegetativo caracterizado por el desarrollo de yemas apicales y axilares son coincidentes con lo reportado por Rodríguez-Laguna *et al.* (2000) para un estudio realizado en el Estado de México. En *P. engelmannii* con el desarrollo de yemas apicales y axilares, las paredes celulares de las células se relajaron y expandieron, lo que permitió su alargamiento. En el caso de las coníferas su estrategia de crecimiento continuo y lento, favorece la supervivencia en ambientes fríos o de baja disponibilidad hídrica, asegurando su persistencia y éxito ecológico en ecosistemas boreales y de alta montaña (Rossi *et al.*, 2016).

La investigación sobre las fases fenológicas de *Juniperus deppeana* ha sido limitada, pero existen estudios que abordan aspectos relacionados con su ecología, genética y manejo (Adams *et al.*, 2007; Herrerías-Mier & Nieto de Pascual Pola, 2020). También se han documentado aspectos relacionados a su fructificación y diseminación indicando periodos que abarcan de septiembre a marzo (Martínez *et al.*, 2007). Las acículas en los *Juniperus* están dispuestas de manera que ofrecen una alta superficie para la fotosíntesis, pero con una estructura adaptada a la conservación del agua, lo que es crucial en su hábitat natural y los convierte en una especie tolerante a condiciones de sequía (Rzendowski y Huerta., 1978). Esta característica se relaciona directamente con la fase de crecimiento, en esta etapa la eficiencia en el uso del agua y la persistencia del follaje permiten a la especie sostener su metabolismo básico y prepararse para las fases reproductivas posteriores (Williams *et al.*, 2010). Existen grandes retos en cuanto a su estudio dado que se cuenta con información limitada.

De manera general, las especies del sitio presentaron un estado de reposo durante el invierno. En estos meses de disminución en su actividad los árboles conservan su energía y agua, el crecimiento de algunas especies se ralentiza significativamente como mecanismo de defensa, ya que los árboles disminuyen su actividad metabólica (Alcantara-Cortes *et al.*, 2019; Valladares *et al.*, 2004).

Posteriormente la estación seca en el sitio de estudio propició la caída de hojas de los árboles forestales derivado del estrés hídrico que provoca en las plantas (Hsiao, 1973). Durante la estación seca, la disponibilidad de agua en el suelo disminuye considerablemente, lo que afecta el transporte de agua desde las raíces hasta las hojas (Valladares *et al.*, 2004). *P. engelmannii* se desprendió de las acículas más viejas lo cual forma parte de su ciclo de vida. Por otro lado, *J. deppeana* no pierde sus hojas anualmente como otras especies caducifolias como *Arbutus* o *Quercus*, esta especie puede experimentar caída de algunas ramas o hojas que se secan, especialmente si la planta está sometida a estrés ambiental, producto de un factor externo.

En la mayoría de las especies se observó que la tasa de crecimiento vegetativo es más rápida durante los meses de verano. Durante este período, la planta también expande su copa y sus raíces, aprovechando las precipitaciones y las temperaturas moderadas que favorecen el crecimiento (Fritts, 1976; Ryan, 2010). Dentro de esta fase el aumento de la temperatura estimula la reanudación del metabolismo celular mientras que el fotoperíodo favorece la activación de las yemas. Por otro lado, el crecimiento y elongación de las mismas se encuentran regulados por las auxinas, que son cruciales para la elongación celular (Cleland, 2010).

No obstante, a los resultados obtenidos en este trabajo, encontramos que implícitamente existen algunas limitaciones que deben tomarse en cuenta para futuras investigaciones. En primer lugar, la temporalidad de los muestreos debiera reducirse para detallar mejor las fenofases, así como extender el periodo de monitoreo. Algunas de ellas presentaron cambios notorios en el lapso de un mes por lo cual refinar el muestreo acortando los tiempos resulta fundamental, incluyendo el diseño de un esquema de muestreo representativo (Zhang *et al.*, 2003). De igual forma, la observación de todas sus fenofases se llevaría a cabo si ampliáramos el muestreo por un par de años. En segundo lugar, y como consecuencia de lo anterior, es conveniente un análisis de costos, ya que los muestreos extendidos a mayor temporalidad suelen incrementar sus alcances científicos, dado que algunas especies requieren más de un año para completar sus ciclos (Valencia-Ávalos *et al.*, 2020). El uso de nuevas herramientas de monitoreo como las cámaras fenológicas son de gran importancia en estudios ecológicos ya que permiten monitorear los cambios en la vegetación a lo largo del tiempo y observar el desarrollo de la vegetación en tiempo casi real (Brown *et al.*, 2016).

CONCLUSIONES

Los resultados del presente estudio confirmaron la importancia del monitoreo fenológico para comprender el comportamiento de las especies al interior de las comunidades. El estudio fenológico de especies coexistentes en un bosque mixto del norte de México evidencia

variabilidad en su temporalidad y duración de las fenofases atribuida a mecanismos funcionales específicos en respuesta al ambiente. En particular, *Pinus engelmannii*, con un inicio temprano en sus fenofases, mientras que en *Arbutus bicolor* fueron aletargadas e incluso ausentes como en *Juniperus deppeana* y *Quercus grisea*. Estas diferencias fenológicas proporcionan información fundamental para predecir las posibles modificaciones en la composición y el funcionamiento de los bosques mixtos frente a los cambios físicos. En conjunto, los resultados refuerzan la importancia de la fenología como herramienta para comprender y prever las respuestas de los ecosistemas forestales frente a las crecientes amenazas del cambio climático, especialmente en regiones biodiversas y vulnerables como el norte de México. Estudios posteriores deberían centrarse en un monitoreo más refinado temporalmente y estructurado por edades, incluyendo el análisis de la suficiencia muestral.

AGRADECIMIENTOS

El primer autor agradece a la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) por la beca otorgada por medio de la convocatoria “Estancias Posdoctorales por México 2023”. Así mismo, se agradece al laboratorio de Dendroecología de la FCFyA por el apoyo de <https://dendrored.ujed.mx/> en la fase de colección de datos y escritura del manuscrito. Se reconoce el arbitraje de revisores anónimos para mejorar el manuscrito.

LITERATURA CITADA

- Acosta-Hernández, A. C., Pompa-García, M., Martínez-Rivas, J. A., & Vivar-Vivar, E. D. (2024). Cutting the Greenness Index into 12 monthly slices: How intra-annual NDVI dynamics help decipher drought responses in mixed forest tree species. *Remote Sensing*, *16*(2), 389.
- Adams, R. P., Schwarzbach, A. E., Nguyen, S., & Morris, J. A. (2007). Geographic variation in *Juniperus deppeana*. *Phytologia*, *89*(2), 132–150.
- Alcantara-Cortes, J. S., Acero-Godoy, J., Alcántara-Cortés, J. D., & Sánchez-Mora, R. M. (2019). Principales reguladores hormonales y sus interacciones en el crecimiento vegetal. *NOVA*, *17*(32), 109–129.
- Allen, C. D., Breshears, D. D., & McDowell, N. G. (2015). On underestimation of global vulnerability to tree mortality and forest die-off from hotter drought in the Anthropocene. *Ecosphere*, *6*(8), 1–55. <https://doi.org/10.1890/ES15-00203.1>
- Anderegg, W. R. L., Trugman, A. T., Badgley, G., Anderson, C. M., Bartuska, A., Ciais, P., Cullenward, D., Field, C. B., Freeman, J., Goetz, S. J., Hicke, J. A., Huntzinger, D., Jackson, R. B., Nickerson, J., Pacala, S., & Randerson, J. T. (2020). Climate-driven risks to the climate mitigation potential of forests. *Science*, *368*(6497), eaaz7005. <https://doi.org/10.1126/science.aaz7005>
- Benavidez, A., Tallei, E., & Schaaf, A. (2023). Reproductive phenology of timber tree species in the Yungas Piedmont Forest of Argentina. *Darwiniana, nueva serie*, *11*(1), 427-449.
- Bonner, F. T., & Vozzo, J. A. (1987). *Seed biology and technology of Quercus*. USDA Forest Service, Southern Forest Experiment Station, General Technical Report SO-66.
- Brown, T. B., Hultine, K. R., Steltzer, H., Denny, E. G., Denslow, M. W., Granados, J., Henderson, S., Moore, D., Nagai, S., SanClements, M., Sánchez-Azofeifa, A., Sonnentag, O., Tazik, D., & Richardson, A. D. (2016). Using phenocams to monitor our changing Earth: toward a global phenocam network. *Frontiers in Ecology and the Environment*, *14*(2), 84–93. <https://doi.org/10.1002/fee.1222>
- Cleland, E. E., Chuine, I., Menzel, A., Mooney, H. A., & Schwartz, M. D. (2007). Shifting plant phenology in response to global change. *Trends in Ecology and Evolution*, *22*(7), 357–365. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2007.04.003>

- Cleland, R. E. (2010). Auxin and Cell Elongation. En P. J. Davies (Ed.), *Plant Hormones: Biosynthesis, Signal Transduction, Action!* (3a ed., pp. 204–220). Springer Dordrecht. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-2686-7_10
- Delpierre, N., Vitasse, Y., Chuine, I., Guillemot, J., Bazot, S., Rutishauser, T., & Rathgeber, C. B. K. (2016). Temperate and boreal forest tree phenology: from organ-scale processes to terrestrial ecosystem models. *Annals of Forest Science*, 73, 5–25. <https://doi.org/10.1007/s13595-015-0477-6>
- Duputié, A., Rutschmann, A., Ronce, O., & Chuine, I. (2015). Phenological plasticity will not help all species adapt to climate change. *Global Change Biology*, 21(8), 3062–3073. <https://doi.org/10.1111/gcb.12914>
- Espelta, J. M., Cortés, P., Molowny-Horas, R., Sánchez-Humanes, B., & Retana, J. (2008). Masting mediated by summer drought reduces acorn predation in Mediterranean oak forests. *Ecology*, 89(3), 805-817.
- Felipe-Lucia, M. R., Soliveres, S., Penone, C., Manning, P., van der Plas, F., Boch, S., Prati, D., Ammer, C., Schall, P., Gossner, M. M., Bauhus, J., Buscot, F., Blaser, S., Blüthgen, N., de Frutos, A., Ehbrecht, M., Frank, K., Goldmann, K., Hänsel, F., Allan, E. (2018). Multiple forest attributes underpin the supply of multiple ecosystem services. *Nature Communications*, 9, 4839. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-07082-4>
- Flores, S., Forister, M. L., Sulbaran, H., Díaz, R., & Dyer, L. A. (2023). Extreme drought disrupts plant phenology: Insights from 35 years of cloud forest data in Venezuela. *Ecology*, 104(5), e4012. <https://doi.org/10.1002/ecy.4012>
- Fritts, H. C. (1976). *Tree Rings and Climate*. Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-268450-0.X5001-0>
- García-Pérez, J. L., Aldrete, A., López-Upton, J., Vargas-Hernández, J. J., & Prieto-Ruiz, J. Á. (2015). Efecto de la condición ambiental y la fertilización en el precondicionamiento de *Pinus engelmannii* Carr. en vivero. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 38(3), 297–304.
- González-Elizondo, M. S., González-Elizondo, M., & Sørensen, P. D. (2012a). *Arbutus bicolor* (Ericaceae, Arbutae), a new species from Mexico. *Acta Botánica Mexicana*, 99, 55–72. <https://doi.org/10.21829/abm99.2012.19>
- González-Elizondo, M. S., González-Elizondo, M., Tena-Flores, J. A., Ruacho-González, L., & López-Enriquez, I. L. (2012b). Vegetación de la Sierra Madre Occidental, México: Una síntesis. *Acta Botánica Mexicana*, 100, 351–403. <https://doi.org/10.21829/abm100.2012.40>
- Gray, R. E. J., & Ewers, R. M. (2021). Monitoring forest phenology in a changing world. *Forests*, 12(3), 297. <https://doi.org/10.3390/f12030297>
- Herrerías-Mier, L. G., & Nieto de Pascual Pola, C. del C. (2020). Structural and demographic characteristics of *Juniperus deppeana* Steud. in two locations in Tlaxcala State. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 11(61). <https://doi.org/10.29298/rmcf.v11i61.618>
- Hsiao, T. C. (1973). Plant Responses to Water Stress. *Annual Review of Plant Physiology*, 24, 519–570. <https://doi.org/10.1146/annurev.pp.24.060173.002511>
- Janssen, T., Van Der Velde, Y., Hofhansl, F., Luyssaert, S., Naudts, K., Driessen, B. & Dolman, H. (2021). Drought effects on leaf fall, leaf flushing and stem growth in the Amazon forest: reconciling remote sensing data and field observations. *Biogeosciences*, 18(14), 4445-4472.
- Keenan, R. J. (2015). Climate change impacts and adaptation in forest management: a review. *Annals of Forest Science*, 72, 145–167. <https://doi.org/10.1007/s13595-014-0446-5>
- Koenig, W.D., Knops, J.M., Carmen, W.J., & Pearse, I. S. (2015). What drives masting? The phenological synchrony hypothesis. *Ecology*, 96(1), 184-192.
- Körner, C., & Basler, D. (2010). Phenology under global warming. *Science*, 327(5972), 1461-1462.
- Madrid-Aispuro, R. E., Cordova-Saucedo, M. D., Prieto-Ruiz, J. Á., Aldrete, A., Salcido-Ruiz, S., & Pérez-Luna, A. (2025a). Crecimiento de *Quercus durifolia* Seemen en sustratos con turba, corteza, aserrín y fertilizante de liberación controlada. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 16(88), 74–97. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v16i88.1526>

- Madrid-Aispuro, R.E., J.A. Prieto-Ruiz, A. Aldrete, S. Salcido-Ruiz, E.D. Vivar-Vivar, L.E. Martínez-Nevárez (2025b). Descripción inicial de la fenología de *Quercus durifolia* Seemen ex Loes. árbol endémico de la Sierra Madre Occidental. *POLIBOTÁNICA*, (60).
- Martínez, A. J., Sainos, P., Lezama Delgado, E., & Angeles-Álvarez, G. (2007). El tamaño sí importa: los frutos grandes de *Juniperus deppeana* Steud. (sabino) son más susceptibles a depredación por insectos. *Madera y Bosques*, 13(2), 65–81. <https://doi.org/10.21829/myb.2007.1321229>
- Molina-Marchan, E., Narváez-Flores, R., & Mojica-Guerrero, A. S. (2024). Estructura horizontal y diversidad de los bosques de *Pseudotsuga menziesii* (Mirb) Franco en México. *Polibotánica*, 0(57), 63–80. <https://doi.org/10.18387/polibotanica.57.4>
- Morellato, L. P. C., Alberton, B., Alvarado, S. T., Borges, B., Buisson, E., Camargo, M. G. G., Cancian, L. F., Carstensen, D. W., Escobar, D. F. E., Leite, P. T. P., Mendoza, I., Rocha, N. M. W. B., Soares, N. C., Silva, T. S. F., Staggemeier, V. G., Streher, A. S., Vargas, B. C., & Peres, C. A. (2016). Linking plant phenology to conservation biology. *Biological Conservation*, 195, 60–72. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2015.12.033>
- Morin, X., Fahse, L., Jactel, H., Scherer-Lorenzen, M., García-Valdés, R., & Bugmann, H. (2018). Long-term response of forest productivity to climate change is mostly driven by change in tree species composition. *Scientific Reports*, 8, 5627. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-23763-y>
- Pecl, G. T., Araújo, M. B., Bell, J. D., Blanchard, J., Bonebrake, T. C., Chen, I. C., Clark, T. D., Colwell, R. K., Danielsen, F., Evengård, B., Falconi, L., Ferrier, S., Frusher, S., Garcia, R. A., Griffis, R. B., Hobday, A. J., Janion-Scheepers, C., Jarzyna, M. A., Jennings, S., Lenoir, J., Linnetved, H. I., Martin, V. Y., McCormack, P. C., McDonald, J., Mitchell, N. J., Mustonen, T., Pandolfi, J. M., Pettorelli, N., Popova, E., Robinson, S. A., Scheffers, B. R., Shaw, J. D., Sorte, C. J. B., Strugnell, J. M., Sunday, J. M., Tuanmu, M. N., Vergés, A., Villanueva, C., Wernberg, T., Wapstra, E., & Williams, S. E. (2017). Biodiversity redistribution under climate change: Impacts on ecosystems and human well-being. *Science*, 355(6332). <https://doi.org/10.1126/science.aai9214>
- Petorelli, N., Wegmann, M., Skidmore, A., Múcher, S., Dawson, T. P., Fernandez, M., Lucas, R., Schaepman, M. E., Wang, T., O'Connor, B., Jongman, R. H. G., Kempeneers, P., Sonnenschein, R., Leidner, A. K., Böhm, M., He, K. S., Nagendra, H., Dubois, G., Fatoyinbo, T., Geller, G. N. (2016). Framing the concept of satellite remote sensing essential biodiversity variables: challenges and future directions. *Remote Sensing in Ecology and Conservation*, 2(3), 122–131. <https://doi.org/10.1002/rse2.15>
- Pezzini, F. F., Ranieri, B. D., Brandão, D. O., Fernandes, G. W., Quesada, M., Espírito-Santo, M. M., & Jacobi, C. M. (2014). Changes in tree phenology along natural regeneration in a seasonally dry tropical forest. *Plant Biosystems - An International Journal Dealing with All Aspects of Plant Biology*, 148(5), 965–974. <https://doi.org/10.1080/11263504.2013.877530>
- Piao, S., Liu, Q., Chen, A., Janssens, I. A., Fu, Y., Dai, J., Liu, L., Lian, X., Shen, M., & Zhu, X. (2019). Plant phenology and global climate change: Current progresses and challenges. *Global Change Biology*, 25(6), 1922–1940. <https://doi.org/10.1111/gcb.14619>
- Pompa-García, M., Romero-Rocha, S., Martínez-Rivas, J. A., Vivar-Vivar, E. D., Rodríguez-Flores, F. D. J., & Yerena-Yamallel, J. I. (2024). Kawí Tamiruyé: A permanent research forest plot in the Sierra Tarahumara. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 15(86), 123-143.
- Pompa-García, M., Camarero, J. J., Valeriano, C., & Vivar-Vivar, E. D. (2025). Variable growth responses of four tree species to climate and drought in a Madrean pine-oak forest. *Forest Ecosystems*, 12, 100292. <https://doi.org/10.1016/j.fecs.2025.100292>
- Pulido, F. J., & Díaz, M. (2005). Regeneration of a Mediterranean oak: a whole-cycle approach. *Ecoscience*, 12(1), 92-102.
- Rodríguez-Laguna, R., Vargas-Hernández, J. J., Cetina-Alcalá, V. M., Ramírez-Herrera, C., & Escalante-Estrada, J. A. (2000). Variación en el patrón de alargamiento del brote

Recibido:
18/mayo/2025

Aceptado:
1/diciembre/2025

- terminal en diferentes procedencias de *Pinus engelmannii* Carr. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 85(87), 77–103.
- Rossi, S., Anfodillo, T., Čufar, K., Cuny, H. E., Deslauriers, A., Fonti, P., & Treml, V. (2016). Pattern of xylem phenology in conifers of cold ecosystems at the Northern Hemisphere. *Global Change Biology*, 22(11), 3804–3813.
- Ryan, M. G. (2010). Editorial: Temperature and tree growth. *Tree Physiology*, 30(6), 667–668. <https://doi.org/10.1093/treephys/tpq033>
- Rzedowski, J., & Huerta, L. (1978). vegetación de México (Vol. 432). México: Editorial Limusa.
- Sáenz-Romero, C., Lindig-Cisneros, R. A., Joyce, D. G., Beaulieu, J., St Clair, J. B., & Jaquish, B. C. (2016). Assisted migration of forest populations for adapting trees to climate change. *Revista Chapingo serie ciencias forestales y del ambiente*, 22(3), 303–323.
- Silva-Ávila, N., Pompa-García, M., & Martínez-Rivas, J. A. (2025). Kawí Tamiruyé: un acceso universal al conocimiento del bosque. Una revisión documental. *Naturaleza y Sociedad. Desafíos Medioambientales*, (11), 60-75.
- Silvestro, R., Deslauriers, A., Prislán, P., Rademacher, T., Rezaie, N., Richardson, A. D., & Rossi, S. (2025). From Roots to Leaves: Tree Growth Phenology in Forest Ecosystems. *Current Forestry Reports*, 11(1), 12.
- Sork, V. L. (1993). Evolutionary ecology of mast-seeding in temperate and tropical oaks (*Quercus* spp.). *Vegetatio*, 107(1), 133–147.
- Taiz, L., Møller, I. M., Murphy, A., & Zeiger, E. (2023). Plant Physiology and Development. En *Plant Physiology and Development*. <https://doi.org/10.1093/hesc/9780197614204.001.0001>
- Tang, J., Körner, C., Muraoka, H., Piao, S., Shen, M., Thackeray, S. J., & Yang, X. (2016). Emerging opportunities and challenges in phenology: A review. *Ecosphere*, 7(8), e01436. <https://doi.org/10.1002/ecs2.1436>
- Tovar-Rocha, V., Rocha-Granados, M. del C., & Delgado-Valerio, P. (2017). Influencia de la maduración del fruto de *Arbutus xalapensis* Kunth sobre la germinación de semillas y embriones cigóticos. *Polibotánica*, 37(19), 79–92.
- Valencia-Avalos, S., Coombes, A. J., Rodríguez-Acosta, M., Parra-Suárez, A., Morales-Sandoval, P., Bassuk, N., González-Rodríguez, A., Llanderal-Mendoza, J., Alvarez-Clare, S., Beckman, E., Carrero, C., Paist, S., & Westwood, M. (2020). *Manual para la propagación de Quercus: una guía fácil y rápida para cultivar encinos en México y América Central* (M. Rodríguez-Acosta & A. J. Coombes, Eds.; 1a ed.). Benemérita Universidad Autónoma de Puebla.
- Valladares, F., Vilagrosa, A., Peñuelas, J., Ogaya, R., Camarero, J. J., Corcuera, L., Sisó, S., & Gil-Pelegrín, E. (2004). Estrés hídrico: ecofisiología y escalas de la sequía. En F. Valladares (Ed.), *Ecología del bosque mediterráneo en un mundo cambiante* (2a ed., pp. 163–190). Ministerio de Medio Ambiente.
- Vitasse, Y., Schneider, L., Rixen, C., Christen, D., & Rebetez, M. (2018). Increase in the risk of exposure of forest and fruit trees to spring frosts at higher elevations in Switzerland over the last four decades. *Agricultural and Forest Meteorology*, 248, 60–69. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2017.09.005>
- Zhang, X., Friedl, M. A., Schaaf, C. B., Strahler, A. H., Hodges, J. C. F., Gao, F., Reed, B. C., & Huete, A. (2003). Monitoring vegetation phenology using MODIS. *Remote Sensing of Environment*, 84(3), 471–475. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(02\)00135-9](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(02)00135-9)