

Corredores invisibles para la conservación del linaloe



Ciencia al Instante

En los bosques secos de México crece el linaloe, un árbol aromático usado en artesanías tradicionales como las cajas de Olinalá, hoy clasificado como vulnerable. Aunque sus poblaciones están fragmentadas entre Morelos, Guerrero y Oaxaca, la genética del paisaje revela que aves frugívoras como *Myiarchus nuttingi* podrían actuar como puentes vivos, transportando semillas y manteniendo el flujo de genes entre bosques distantes. Descubrir estos corredores invisibles cambia la forma de conservar la especie, pues proteger al linaloe no significa solo cuidar árboles aislados, sino preservar las conexiones ecológicas que sostienen su diversidad y su futuro.



Artículo



Corredores invisibles para la conservación del linaloe

En la naturaleza nada existe por sí solo. Rachel Carson.



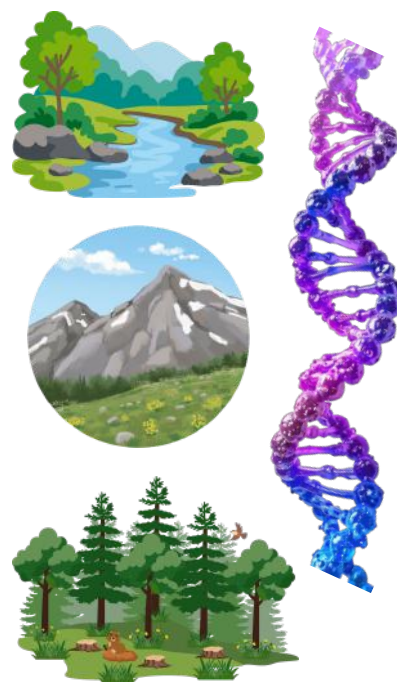
Cómo citar este artículo: Cruz-Larios I, Moreno-Letelier A. 2026. Corredores invisibles para la conservación del linaloe. Revista Ciencia y Naturaleza (1220).



Lo que la genética nos puede decir sobre conservación

Aunque las plantas parecen permanecer fijas a lo largo de su vida, sus genes pueden desplazarse entre poblaciones mediante el movimiento de polen y semillas. Este intercambio genético, conocido como flujo génico, permite mantener la diversidad genética y reducir el aislamiento entre poblaciones.

Cuando los ecosistemas se fragmentan por carreteras, agricultura o pérdida de cobertura vegetal, este intercambio puede disminuir, generando poblaciones cada vez más aisladas. En este contexto, la genética del paisaje surge como una herramienta que integra información genética, espacial y ecológica para entender cómo los cambios en el uso del suelo influyen en la conectividad y la estructura genética de las especies (1). Mediante análisis de ADN es posible identificar si las poblaciones permanecen conectadas o si comienzan a mostrar señales de aislamiento.



El bosque seco: un ecosistema fragmentado

El bosque tropical caducifolio, también conocido como bosque seco, es uno de los ecosistemas más diversos y amenazados de México. Se caracteriza por una marcada estacionalidad en donde los árboles pierden sus hojas la mayor parte del año. A pesar de su importancia ecológica, se estima que gran parte de la cobertura original ha sido modificada por actividades humanas (2,3). Entre las principales actividades que han transformado este ecosistema se encuentran la expansión agrícola y ganadera, la extracción de leña, los incendios inducidos y el cambio de uso de suelo para asentamientos humanos.



El linaloe como modelo de especie restringida

El linaloe (*Bursera linanoe*) es un ejemplo de las especies vegetales con distribución geográfica restringida en México. Su presencia se concentra principalmente en regiones del bosque tropical caducifolio del centro y sur del país, en poblaciones aisladas entre sí por la topografía, el clima y la transformación de su entorno (Figura 1). Esta distribución limitada lo convierte en un modelo ideal para estudiar los efectos de la fragmentación del hábitat sobre la diversidad genética.



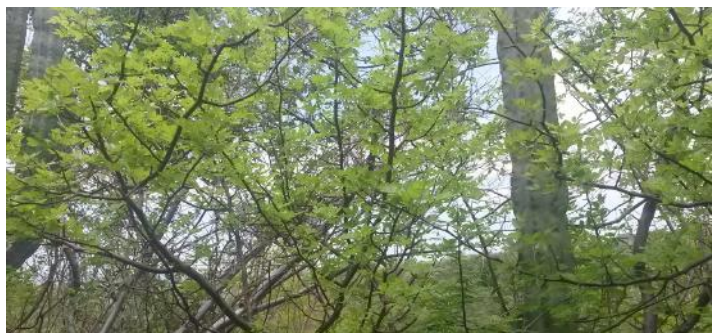
Figura 1. Registros de *Bursera linanoe* en México (círculos rosas: Morelos, verdes: Guerrero, azules: Puebla, amarillos: Oaxaca).

A diferencia de especies ampliamente distribuidas, las especies restringidas suelen depender de un número reducido de poblaciones para mantener su variabilidad genética. La Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (IUCN por sus siglas en inglés) considera la extensión o área de distribución geográfica como uno de los criterios para que una especie se encuentre en alguna categoría de amenaza. Tomando como referencia el Bosque de Chapultepec, si el área de ocupación de una especie es aproximadamente 285 veces la superficie de este parque (2,000 km²), la especie se considera vulnerable.



Si su distribución se reduce a cerca de 70 veces Chapultepec (500 km²), se clasifica en peligro. Finalmente, cuando el área de ocupación es apenas ligeramente mayor que la superficie de este bosque (10 km²), la especie se considera en peligro crítico (4). La IUCN publica estas evaluaciones en la denominada Lista Roja de Especies Amenazadas, una base de datos internacional utilizada para identificar el estado de conservación de miles de especies de plantas y animales a nivel mundial.

Esta clasificación considera factores como el tamaño poblacional, la fragmentación, la reducción del hábitat y las tendencias de disminución de las poblaciones.



De acuerdo con la Lista Roja de la IUCN, el linaloe se encuentra en la categoría de vulnerable, debido a que se estima que su área de ocupación es menor a 285 veces la superficie del Bosque de Chapultepec. Además, las poblaciones de la especie se encuentran severamente fragmentadas y se ha observado una disminución continua en la calidad de su hábitat, factores que incrementan el riesgo para su persistencia a largo plazo (Figura 1).



Figura 2. Categorías de riesgo de extinción de la Lista Roja de la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (IUCN por sus siglas en inglés), que ordenan a las especies según su probabilidad de extinción, desde menor preocupación hasta extintas. El linaloe se ubica actualmente en la categoría Vulnerable.



La importancia del linaloe

El género *Bursera* ocupa un lugar central en la ecología del bosque tropical caducifolio de México, donde constituye uno de los componentes arbóreos más característicos y funcionalmente importantes. Muchas especies de este género dominan la estructura del dosel y aportan recursos clave para la fauna en periodos de escasez. Su marcada estacionalidad foliar y su capacidad de adaptarse a suelos pobres y condiciones climáticas extremas influyen en la dinámica de nutrientes, la regeneración del bosque y la resiliencia del ecosistema frente a disturbios.

En el ámbito cultural, el linaloe ha sido aprovechado históricamente por comunidades locales debido a su madera aromática, utilizada en la elaboración de artesanías tradicionales (5,6). Una de las expresiones culturales más representativas son las cajas de Olinalá, reconocidas por el uso de lacas decorativas y por el aroma característico de la madera. Además, el aceite esencial extraído de la especie ha sido utilizado tradicionalmente con fines medicinales y aromáticos en distintas regiones del sur de México (5). Este uso ancestral ha generado un vínculo estrecho entre la especie y las prácticas culturales regionales, reforzando su valor patrimonial.

Debido a su importancia económica y cultural, distintas poblaciones de linaloe han sido aprovechadas históricamente por comunidades locales, lo que también ha contribuido a presiones de extracción que, en ausencia de un manejo adecuado, pueden afectar su viabilidad. Por lo tanto, es fundamental promover estrategias de manejo sustentable y conservación.





¿Puede el ADN de un árbol decirnos cómo está fragmentado un ecosistema?

La genética del paisaje (ver cuadro de conceptos) permite analizar la variación genética entre individuos y poblaciones. A grandes rasgos, si dos poblaciones intercambian genes con frecuencia, sus perfiles genéticos tienden a ser similares. En cambio, cuando el flujo génico (ver cuadro de conceptos) es limitado, las poblaciones comienzan a diferenciarse, acumulando variantes genéticas propias.



Para comprender este proceso en el linaloe, se comparó el ADN de árboles provenientes de distintas regiones del centro-sur de México. Para ello se utilizaron marcadores genéticos que permiten reconocer semejanzas y diferencias entre poblaciones.

Esta información ayudó a reconstruir qué poblaciones mantienen mayor intercambio genético y cuáles presentan señales de aislamiento. Así, fue posible identificar fronteras genéticas que no siempre corresponden directamente con la distancia geográfica entre los sitios.

Tres regiones genéticas, un paisaje complejo

Uno de los hallazgos más importantes fue que las poblaciones de linaloe no forman una sola unidad genética. Se distinguen tres regiones principales asociadas con Morelos, Guerrero y Oaxaca. Esto indica que el intercambio de genes ocurre con mayor frecuencia entre árboles cercanos, mientras que entre regiones más alejadas resulta más limitado (Figura 3). Las poblaciones del sur de Oaxaca presentaron un mayor grado de diferenciación genética, lo que sugiere que han permanecido relativamente aisladas. Este patrón probablemente refleja la influencia



conjunta de la distancia, la topografía, la fragmentación del bosque y la historia evolutiva de la especie. En otras palabras, el paisaje puede favorecer o dificultar el movimiento de genes entre poblaciones. Por otro lado, las poblaciones ubicadas en la parte central de la distribución mostraron una conectividad más alta, lo que indica que todavía existe intercambio genético entre ellas. Estos resultados sugieren la presencia de corredores biológicos que continúan facilitando el movimiento de polen y semillas, aunque no de manera uniforme en todo el paisaje.

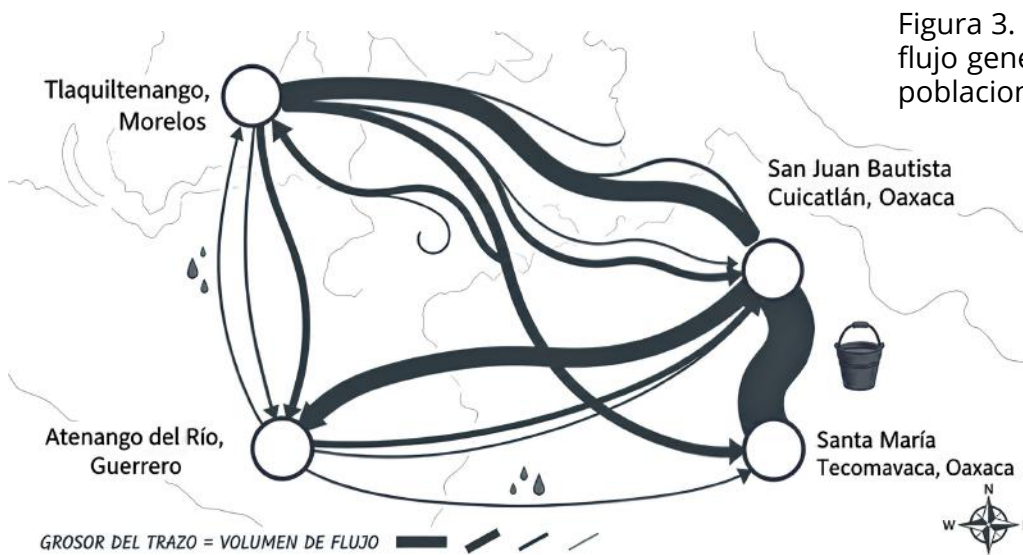


Figura 3. Representación del flujo genético desigual entre poblaciones de linaloe.

Rol de las poblaciones fuente y sumidero

No todas las poblaciones del linaloe intercambian genes de la misma manera: algunas funcionan como nodos de conexión, mientras que otras reciben genes, evidenciando un flujo genético desigual. Algunas poblaciones en términos de conservación pueden actuar como fuentes y otras como sumideros. En términos de conservación poblacional, las poblaciones fuente se caracterizan por mantener tasas reproductivas positivas y exportar individuos hacia áreas vecinas, contribuyendo al flujo genético y a la estabilidad regional.



En contraste, las poblaciones sumidero son aquellas donde nacen menos individuos de los que se pierden por muerte o degradación del hábitat, por lo que necesitan recibir constantemente individuos provenientes de otras poblaciones para poder mantenerse a lo largo del tiempo. Esta dinámica fuente-sumidero es especialmente relevante en paisajes fragmentados y bajo presión antropogénica, donde la alteración de la calidad del hábitat puede transformar poblaciones originalmente viables en sumideros ecológicos. Reconocer qué poblaciones cumplen cada función es esencial para diseñar estrategias efectivas de manejo, priorizar áreas para la conservación y garantizar la conexión funcional del paisaje.

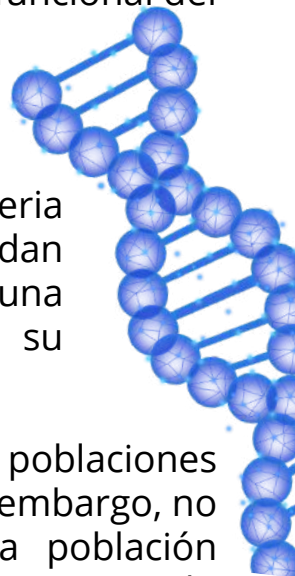
Diversidad genética

La diversidad genética (ver cuadro de conceptos) es la materia prima de la evolución y permite que las poblaciones respondan a enfermedades, sequías o cambios ambientales. Cuando una especie pierde diversidad genética, también disminuye su capacidad para enfrentar los desafíos del futuro.

En el caso del linaloe, los análisis muestran que las distintas poblaciones aún conservan una parte importante de esa variabilidad. Sin embargo, no todas poseen las mismas características genéticas. Cada población representa una pieza distinta de la historia evolutiva de la especie, por lo que conservar únicamente una parte de ellas no sería suficiente para preservar toda su diversidad.

¿Quién moldea la diversidad genética del linaloe?

En varios organismos, la diversidad genética es el resultado de procesos dinámicos que operan a escala del paisaje. Los genes que hoy conforman una población son el resultado de miles de eventos de dispersión ocurridos a lo largo del tiempo.





En este contexto, los principales agentes del intercambio genético no son los árboles en sí, sino los organismos que transportan sus semillas. Pero ¿quién transporta esas semillas?

Para responder esta pregunta se comparó la distribución geográfica del linaloe con la de distintas especies de aves frugívoras. Cuando las áreas de distribución de dos especies coinciden de manera consistente, aumenta la posibilidad de que interactúen en la naturaleza y de que las aves participen en la dispersión de sus semillas.

La comparación permitió identificar a varias aves de la familia *Tyrannidae* como posibles dispersoras del linaloe, particularmente *Myiarchus nuttingi* y *Tyrannus crassirostris* (Fig. 4).



Estas especies podrían contribuir al transporte de semillas entre fragmentos de vegetación, favoreciendo el intercambio genético entre poblaciones. Además, estudios previos han documentado que especies del género *Myiarchus* consumen frutos y dispersan semillas de otras especies de *Bursera*, lo que refuerza la hipótesis de que también desempeñan este papel en el linaloe (7,8).



Cuando dos poblaciones presentan una composición genética muy parecida, es probable que, a lo largo del tiempo, hayan permanecido conectadas mediante el transporte de semillas. En cambio, cuando las diferencias genéticas son mayores, esto sugiere que ese intercambio ha sido poco frecuente o se ha interrumpido.

Estos patrones genéticos no ocurren al azar, sino que reflejan procesos ecológicos complejos, como la dispersión de semillas y la configuración del paisaje



De esta manera, el ADN funciona como un registro histórico que permite reconstruir los movimientos de los dispersores a través del paisaje.

Implicaciones para la conservación y la restauración

Tradicionalmente, los programas de restauración forestal se han basado en criterios como la disponibilidad de semillas o la proximidad geográfica. Sin embargo, la genética muestra que el manejo de las semillas de una misma especie no puede ser intercambiable entre poblaciones alejadas. Introducir material vegetal de una región genéticamente distinta puede alterar adaptaciones locales y afectar la viabilidad de las poblaciones a largo plazo.

Por ello, la información genética permite definir unidades de manejo más precisas, como las denominadas Zonas de Movimiento de Germoplasma Forestal, utilizadas para orientar el intercambio de semillas y material vegetal entre regiones ecológica y genéticamente compatibles. Este enfoque ayuda a diseñar estrategias de restauración que respeten la estructura genética natural de la especie.

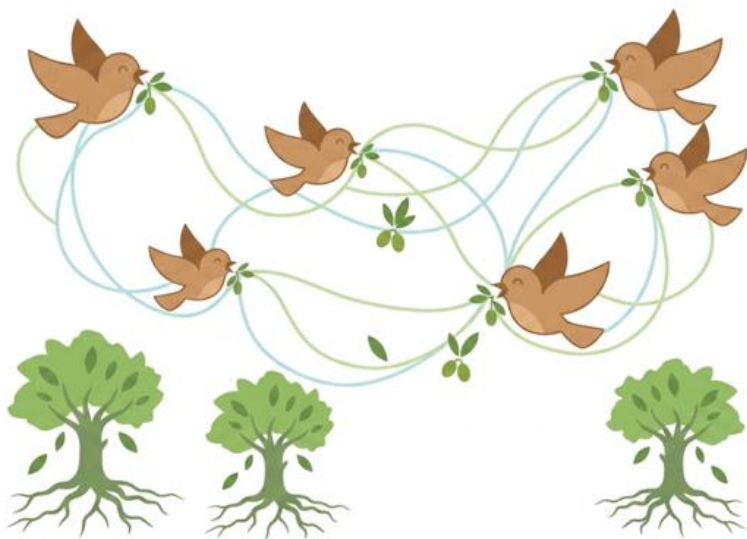


Además, la identificación de corredores genéticos funcionales ayuda a priorizar áreas clave para la conservación. Proteger y restaurar estos corredores puede ser más efectivo que centrarse únicamente en fragmentos aislados, ya que mantienen el flujo génico (ver cuadro de conceptos) necesario para la resiliencia del sistema. Entre las acciones prioritarias destacan el uso de semillas locales en restauración, la conservación de corredores biológicos y la protección de poblaciones reproductivas que mantengan el flujo genético entre regiones.



Implicaciones para la conservación y la restauración

La conservación del linaloe no depende solo de proteger individuos o poblaciones aisladas, sino de mantener las conexiones que los enlazan como parte de un sistema dinámico. La genética del paisaje (ver cuadro de conceptos) nos recuerda que muchas de estas conexiones son invisibles y deben estudiarse. Al integrar información genética con el análisis espacial, es posible diseñar estrategias de conservación más informadas y eficaces, capaces de enfrentar los retos que impone la fragmentación del bosque tropical caducifolio en México. En un contexto de cambio ambiental acelerado, comprender y preservar estos corredores invisibles puede marcar la diferencia entre la persistencia y la pérdida de especies emblemáticas como el linaloe (Figura 5). 🍀



"La conservación debe considerar no solo las especies, sino también los procesos que las mantienen."
Primack

Figura 5. Diagrama que resalta la importancia de las conexiones entre árboles y aves.

Agradecimientos

Este trabajo fue posible gracias a la beca posdoctoral financiada por la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) asignada a la primera autora y al proyecto PAPIIT-DGAPA IN217625 asignado a AML.



Conceptos

Genética de la conservación: Es una disciplina que aplica los principios y herramientas de la genética de poblaciones para entender, manejar y preservar la diversidad genética de las especies, especialmente aquellas en riesgo por factores como la fragmentación del hábitat, la pérdida poblacional, el manejo desmedido o el cambio climático.

Genética del paisaje: disciplina que combina datos genéticos y análisis espaciales para identificar patrones de conectividad, aislamiento y flujo génico entre poblaciones.

Flujo génico: es el movimiento de genes entre poblaciones mediante dispersión de semillas o de polen a través de polinizadores u otros vectores. Es crucial para mantener la variabilidad genética y evitar diferenciación excesiva entre poblaciones aisladas.

Diversidad genética: es la variedad de combinaciones genéticas presentes dentro y entre poblaciones. Permite que las especies respondan a cambios ambientales y mantengan su capacidad adaptativa a largo plazo.

Marcador genético: son secuencias específicas de ADN que presentan variación detectable entre individuos, poblaciones o especies, y que se utilizan para identificar diferencias genéticas, estimar relaciones evolutivas, evaluar diversidad genética y analizar patrones de estructura y conectividad poblacional.

Crédito de imágenes en orden de aparición: Fotos de portada proporcionada por los autores, vistastudio, Tetiana Kasatkina, Canva AI Studio, Monster Images, Violetta, painting tools, pixabay, Canva AI Elements Lab, (Toku & Nana) with AI. Créditos de figuras o fotografías: Fig. 1 Obtenida en línea [Link], Fig. 1 Creada por autores. Fig. 2. Modificado de la Lista Roja de la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza. Figs. 3, 4 y 5 Creadas con IA [Link]. Los autores declaran que ningún párrafo ha sido generado completamente o con más del 50% de sus palabras con esta herramienta.



Para Consulta

- Holderegger R, Wagner HH. 2008. Landscape genetics. *BioScience* 58(3): 199–207. [\[Link\]](#)
- Trejo I, Dirzo R. 2000. Deforestation of seasonally dry tropical forest: a national and local analysis in Mexico. *Biological Conservation* 94(2): 133–142.
- Mesa-Sierra N, de la Peña-Domene M, Campo J, *et al.* 2022. Restoring Mexican tropical dry forests: A national review. *Sustainability* 14: 3352. [\[Link\]](#)
- IUCN. (2012). IUCN Red List categories and criteria: Version 3.1 (2nd ed.). International Union for Conservation of Nature. iii + 41pp.
- Hersch P, Glass R, Fierro-Álvarez A. 2004. El linaloe [*Bursera aloexylon* (Schiede) Engl.]: Una madera aromática entre la tradición y la presión económica. In: Alexiades MN, Shanley P. eds. *Productos forestales, medios de subsistencia y conservación*. Center for International Forestry Research. pp. 413-436.
- Maldonado B, Caballero J, Delgado-Salinas A, *et al.* 2013. Relationship between use value and ecological importance of floristic resources of seasonally dry tropical forest in the Balsas River Basin, México. *Economic Botany* 67: 17-29. [\[Link\]](#)
- Almazán-Núñez RC, Eguiarte LE, del Coro Arizmendi M, *et al.* 2016. Myiarchus flycatchers are the primary seed dispersers of *Bursera longipes* in a Mexican dry forest. *PeerJ* 4: e2126. [\[Link\]](#)
- Ramos-Ordóñez MF, Arizmendi MC. 2011. Parthenocarpy, attractiveness and seed predation by birds in *Bursera morelensis*. *Journal of Arid Environments* 75: 757-762. [\[Link\]](#)

Dra. Verónica Reyes-Galindo

Co-Editora Invitada.

Primer Congreso Mexicano de Evolución

Diseño de publicación: Sofia Paz



Iris Cruz Larios

Jardín Botánico, Instituto de Biología, Universidad Nacional Autónoma de México. Investigadora Posdoctoral en el Jardín Botánico del Instituto de Biología de la UNAM. Su investigación se centra en la diversidad genética y la conservación de especies del bosque tropical seco con énfasis en especies del género *Bursera*.

contacto: iris.cruz@st.ib.unam.mx



Alejandra Moreno Letelier

Jardín Botánico, Instituto de Biología, Universidad Nacional Autónoma de México. Investigadora del Jardín Botánico del Instituto de Biología de la UNAM. Se especializa en biología evolutiva de plantas, mediante enfoques de genética de poblaciones, genómica, filogeografía, sistemática y modelación de distribución potencial.

contacto: amletelier@ib.unam.mx