

Manejo adaptable de bosques ante alteraciones ambientales severas: lecciones del Volcán Parícutín y del cambio climático

Roberto A. Lindig-Cisneros¹, Cuauhtémoc Sáenz-Romero²
y Erika Gómez-Pineda²*

¹Instituto de Investigaciones en Ecosistemas y Sustentabilidad, UNAM, campus Morelia;

²Instituto de Investigaciones Agropecuarias y Forestales, UMSNH; (*rlindig@cieco.unam.mx)

Resumen

A pesar del excelente manejo forestal sustentable que realiza la Comunidad Indígena de Nuevo San Juan Parangaricutiro (CINSJP), que ha incluido innovaciones en el campo de la restauración ambiental, el cambio climático muy probablemente generará una declinación forestal, particularmente de *Pinus pseudostrobus*, la especie económicamente más valiosa, pero a la vez susceptible. Se presenta la síntesis de diversos trabajos de investigación sobre estos temas con la comunidad. Se recomienda realizar un manejo adaptativo integrado a los programas de reforestación que aminore los impactos esperados del cambio climático, colectando semilla local, produciendo planta en vivero y plantando a 300 m de mayor altitud que el origen de la semilla; esto para compensar el incremento de temperatura de 1.5 °C previsto para el año 2030. En el límite altitudinal inferior de la distribución natural de *Pinus pseudostrobus* (2200 a 2300 m), se recomienda

realizar las reforestaciones con *Pinus devoniana* (sinónimo de *Pinus michoacana*) que es más resistente al estrés por sequía que *P. pseudostrobus*. En términos de manejo, la restauración de arenales del Volcán Parícutín se hará gradualmente más lenta y difícil, por el estrés hídrico debido al cambio climático, que se sumará a la ya de por sí difícil barrera que representa la ceniza volcánica.

Palabras clave: Restauración ecológica, sucesión, barreras ecológicas, reforestación, Volcán Parícutín.

Abstract

Despite excellent forest management practices by the Indigenous Community of Nuevo San Juan Parangaricutiro (CINSJP), that include several innovations in the field of environmental restoration, climate change most probably will cause forest decline, particularly of *Pinus pseudostrobus*, the most susceptible species as well as the most valuable species but susceptible. We synthesize the results of several studies concerning this issues with the community. An integral adaptive management, integrated into reforestation programs, is recommended to reduce the expected impact of climate change. This can be achieved by collecting from local seed sources, producing the plants and planting 300 m above the site of origin of the seeds. This will allow to compensate the 1.5°C increment forecasted by 2030.

At the lowest altitudinal limit of the natural distribution of *Pinus pseudostrobus* (2200 to 2300 m), it is recommended to make reforestations with *Pinus devoniana* (Michoacan pine) because it better tolerates drought stress than *P. pseudostrobus*. Environmental restoration in the areas covered by volcanic ash from the Parícutin volcano will become gradually more difficult, by the combined effect of climate change hydric stress and the already harsh barrier posed by the physical conditions of the ash.

Keywords: Environmental restoration, succession, ecological barriers, reforestation, Parícutin Volcano

Introducción

Las alteraciones ambientales severas pueden tener orígenes diversos. Pueden ser tanto consecuencia de eventos naturales como de actividades humanas y es cada vez más frecuente que sus efectos se combinen de forma compleja en territorios manejados. Cuando esto ocurre, se deben de adaptar las estrategias de manejo

para lograr un uso eficiente de los recursos y a la vez garantizar su permanencia a largo plazo. Este es el principio del manejo adaptable, que se puede aplicar a actividades tan diversas como la conservación, la silvicultura, la agricultura y la restauración ambiental. En el campo de la restauración ambiental, la “restauración adaptable” es un esquema de manejo aplicado a la recuperación de ecosistemas, que consiste en la implementación de una serie de medidas alternativas, la evaluación de sus resultados y la integración del conocimiento adquirido a etapas subsecuentes del manejo del ecosistema para dirigirlo hacia las metas deseadas (Christensen *et al.* 1996).

En el año 2000 iniciamos un proyecto para mejorar la sobrevivencia y crecimiento de las reforestaciones, mediante un mejor acoplamiento entre los genotipos de la planta producida en los viveros comunitarios y el ambiente de los sitios a reforestar, además de desarrollar un huerto semillero para producir semilla genéticamente mejorada de *Pinus pseudostrobus*, a partir de un ensayo de progenies de medios hermanos originadas de árboles de buena calidad.

En el año 2001, se puso en operación un proyecto de investigación basado en el principio de la restauración adaptable con la Dirección Técnica Forestal de la Comunidad Indígena de Nuevo San Juan Parangaricutiro (Lindig-Cisneros *et al.* 2007), con el objetivo principal de incorporar áreas afectadas por la erupción de Volcán Parícutín, a la actividad forestal y posteriormente incrementar la biodiversidad de reforestaciones bajo otras condiciones de disturbio. Lo anterior porque los efectos de la erupción del Volcán Parícutín todavía eran evidentes a principios del presente siglo, desde luego en la zona afectada por el derrame magmático, pero para fines de manejo forestal, de particular interés eran los “arenales” que son áreas cubiertas por ceniza de la erupción en donde la cubierta forestal no se recupera de manera natural.

En el año 2002 arrancó el trabajo de investigación para incorporar a las estrategias de manejo forestal y de restauración las consecuencias esperadas por el cambio climático. La intención de mejorar el acoplamiento genotipo/ambiente se amplió a generar información que permita decidir el movimiento altitudinal hacia arriba de germoplasma. Lo anterior con el fin de compensar los efectos esperados del cambio climático, considerando la diferenciación genética entre poblaciones dentro de las principales especies forestales, a lo largo de gradientes ambientales.

Considerar los efectos del cambio climático en los planes de manejo forestal es de la mayor importancia. En Michoacán se ha proyectado que es de esperarse un

incremento de temperatura media anual (respecto al promedio 1961-1990), de 1.4 °C para la década centrada en el año 2030, 2.2 °C para 2060 y de 3.6 °C para 2090. Así mismo, la precipitación anual decrecerá en 5.6 % para el año 2030, 5.9 % para el año 2060 y 7.8 % para el año 2090 (Sáenz-Romero et al 2012a). Esto creará un desfase adaptativo entre las poblaciones de especies forestales y el clima para el cual están adaptadas las poblaciones. Es decir, el clima para el cual han evolucionado las poblaciones de especies forestales, ya no ocurrirá en el mismo lugar, sino a mayor altitud (Sáenz-Romero et al 2016). Esto inducirá una declinación forestal. Es decir, los árboles estarán gradualmente más estresados, lo cual los debilitará y los hará más susceptibles al ataque de plagas y enfermedades, causando eventualmente su muerte (Alfaro et al 2014).

Metodología

Para el presente trabajo se sintetizan los resultados obtenidos en 16 años de investigación llevada a cabo por nuestro grupo de trabajo con la Dirección Técnica Forestal de la CINSJP y que han sido publicados en el pasado en diversos medios. En total son 11 trabajos publicados en revistas científicas y, adicionalmente, se describen resultados de proyectos en proceso, aún no publicados. Los objetivos son presentar una visión general de los retos de manejo en lugares en donde se ha dado la interacción entre diversos tipos de disturbio, en particular la erupción del Volcán Parícutín, sumado a los efectos del uso agrícola del suelo, el manejo forestal y el cambio climático.

Resultados y discusión

Restauración ecológica de arenales

En 2001 se iniciaron trabajos de investigación en restauración ecológica en el arenal de La Mesa de Cutzato (19°30'42.4" N, 102°12'03.0" O; 2,450 m s.n.m.). La vegetación asociada a los arenales en la actualidad consiste en manchones de vegetación separados entre sí por extensiones de arena totalmente desprovista de cobertura (Figura 1). En los manchones, las especies dominantes son: *Eupatorium glabratum*, *Senecio stoechadiformis*, *S. salignus* y *Muhlebergia minutissima*. En este sitio se evaluó la estructura de la escasa vegetación que se desarrolla y se encontró una relación entre la profundidad de la capa de ceniza volcánica y la presencia de los manchones de vegetación presente (Lindig-Cisneros et al. 2002).

Este trabajo se basó en investigación sobre el desarrollo de la vegetación durante y después de la erupción del Volcán Parícutín (Eggler 1948, 1963).



Figura 1. Vista parcial del arenal de la Mesa de Cutzato antes de que el trabajo de restauración iniciara. Se puede apreciar la escasa vegetación y el color prácticamente negro de la ceniza volcánica, lo que ocasiona que se caliente a más de 60°C.

Se estableció que los arenales representan lo que se conoce en restauración ambiental como un estado de sucesión detenida. La sucesión detenida ocurre cuando hay factores abióticos o bióticos que impiden el desarrollo de la vegetación siguiendo las trayectorias comunes para el ecosistema (Young *et al.* 2001). En el caso de los arenales, las barreras principales son la profundidad de la capa de ceniza y las temperaturas que alcanza cerca de su superficie, que pueden ser tan altas como 60°C a 4 cm de profundidad.

Para tratar de superar el estado de sucesión detenida de los arenales, se estableció un primer ensayo en el cual se plantaron pinos nativos y un arbusto fijador de nitrógeno a través de la relación simbiótica que es común en las leguminosas, *Lupinus elegans* (Figura 2). Se probó el efecto de la corteza molida como acolchado para reducir la temperatura que alcanza la ceniza volcánica en los meses más secos de año (de abril a principios de junio). Los resultados de este ensayo mostraron la eficacia del uso de un acolchado en los arenales pues los árboles protegidos de esta manera tuvieron el doble de supervivencia que el control, en particular este efecto fue notable para *Pinus pseudostrobus*, que es la especie más sensible a la sequía (Blanco-García y Lindig-Cisneros 2005, Blanco-García *et al.* 2008).

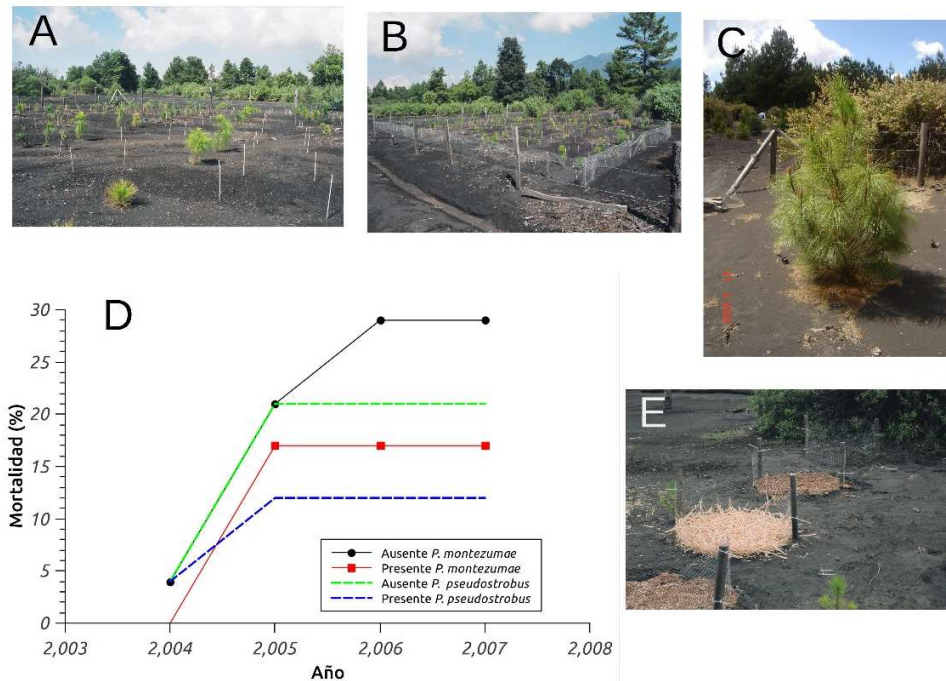


Figura 2. Ensayos de especies en los arenales generados por la erupción del Volcán Parícutín, ensayo de *Pinus pseudostrabus* y *Lupinus elegans* (A), ensayo de *P. pseudostrabus* y *P. montezumae* (B), individuo a los tres años de plantado (C), mortalidad para las dos especies de pinos con y sin acolchado (D), ensayo de acolchados para favorecer el establecimiento de plantas del sotobosque (E).

Otra barrera importante para superar era el grosor de la capa de ceniza volcánica que cubre el suelo, barrera que se superó por el efecto positivo que el acolchado tiene para favorecer el crecimiento de plantas. Pero fue posible determinar que este efecto es positivo a largo plazo solamente si la capa de ceniza es menor a 60 centímetros, pues esta profundidad permite que las plantas puedan desarrollar en los primeros años un sistema radicular que llegue al suelo que quedó cubierto por la ceniza. Para superar esta barrera el retiro de la ceniza es la única técnica apropiada, lo que se implementó por primera vez en otro arenal, el Llano de Pario (19°29'6" N, 102°41' 46" O). La experiencia obtenida de los ensayos que se llevaron a cabo en el Llano de Pario, indicaron que es posible recuperar la vegetación, en particular la cobertura arbórea, si se utilizan la combinación de técnicas adecuadas y se seleccionan las mejores especies, en este caso *Pinus montezumae* (Figura 2). Sin embargo, el uso del acolchado y la remoción de ceniza no facilitan que se

Manejo adaptable de bosques ante alteraciones ambientales severas: lecciones del Volcán Parícutín...

establezcan otras especies vegetales, en particular especies herbáceas. Dos barreras impiden el establecimiento de la vegetación del sotobosque: las condiciones del sustrato y la herbivoría. Al excluir a los herbívoros pequeños (principalmente conejos), y al mejorar las condiciones del sustrato al substituir el tipo de acolchado (se adicionó paja de trigo en lugar de corteza de pino) se logró el establecimiento de diversas especies del sotobosque (Nava-Sosa *et al.* 2010).

Esta serie de experiencias en restauración adaptable indica que la recuperación de los arenales es posible, pero que el efecto combinado de actividades humanas que alteran los ecosistemas como la agricultura y de eventos naturales como las erupciones volcánicas, pueden crear condiciones que establecen dinámicas no lineales en los ecosistemas forestales templados (Figura 3). Las condiciones físicas de los arenales formados por la actividad del Parícutín impiden la trayectoria natural de la sucesión ecológica y evitan, por lo tanto, que se den cambios graduales y continuos en la estructura de la vegetación. En estas zonas es necesario crear condiciones diferentes a través de técnicas de restauración que se adapten a las condiciones de cada sitio en particular, como colocar acolchados o eliminar la ceniza para permitir que las plantas se desarrollen.

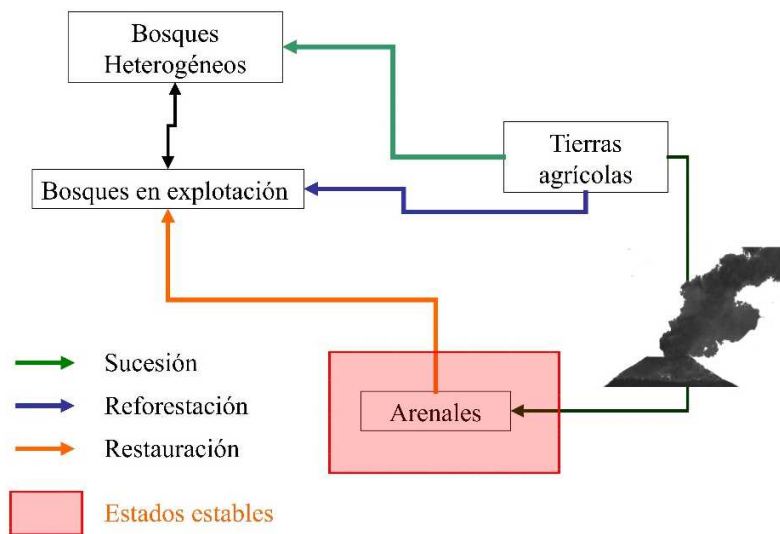


Figura 3. Posibles rutas de cambio de la vegetación en los sistemas manejados en los alrededores del Volcán Parícutín. Las tierras agrícolas o cualquier sitio carente de cobertura arbórea, puede reforestarse o recuperar las especies forestales como consecuencia de procesos sucesionales. Cuando ocurre una erupción volcánica, se pueden formar arenales que representan un estado estable, el cual, para ser recuperado, requiere de intervención directa.

Etapas subsiguientes de trabajo en colaboración con la CINSJP han permitido ampliar los ensayos de restauración a más localidades con diferentes historias de disturbio, incluyendo sitios que no fueron impactados por la erupción del Parícutín, de tal forma que se ha trabajado en arenales, en los cuales se ha removido mecánicamente la mayor parte de la capa de arena volcánica y sitios agrícolas abandonados. Estos últimos son similares a los que dieron origen a los arenales hace más de 50 años, cuando la deposición de ceniza del Parícutín sobre campos agrícolas les dio origen. El comparar localidades con diferentes historias de disturbio nos ha permitido entender la dinámica de los procesos de restauración y en particular las relaciones entre las historias de disturbio y las barreras al establecimiento de la vegetación (Lindig-Cisneros *et al.* 2012).

En la actualidad, a diferencia de 1943, el paisaje de la región en la que se encuentra el Volcán Parícutín es muy diferente, pues los bosques han dado lugar, en buena parte de su extensión histórica, a campos de cultivo y huertos. Si ocurriera en el presente una erupción como la del Parícutín, sus efectos podrían ser más severos que en ese año, pues se crearían arenales de mayores dimensiones. Si se diera este caso, la recuperación de la tierra y la creación de bosques u otros tipos de ecosistemas, incluyendo zonas productivas para la agricultura, requeriría de un esfuerzo considerable.

Si las condiciones creadas por historias complejas de disturbio que combinan efectos de actividades humanas y de eventos naturales como la erupción del Volcán Parícutín, hacen necesario desarrollar técnicas y formas de manejo originales y adaptables, las consecuencias esperadas del cambio climático obligan a establecer nuevas formas de manejo.

Acoplamiento genotipo/medio ambiente

Una colecta de semillas de ocho poblaciones de *Pinus pseudostrobus* en un transecto a todo lo largo de la distribución altitudinal de esta especie en CINSJP, desde Joya del Durazno (19° 27.8' N, 102° 08.9' O, 2200 m de altitud) hasta Cerro de Parí (19° 28.4' N, 102° 11.0' O, 2900 m), y semilla obtenida de otras procedencias de *P. pseudostrobus* de Michoacán (Coalcomán, Cd. Hidalgo y Pátzcuaro de otras variedades (*P. pseudostrobus* var. *apulcensis*, de Perote, Ver., y de Zimapán, Hgo.) e incluso de otras especies (*Pinus montezumae* Chignahuapan y Zacatlán, Pue. y *P. hartwegii* de Chignahuapan, Pue.), se usó para producir planta en vivero y establecer una serie de ensayos de procedencias, variedades y especies. Los ensayos de campo se establecieron en los bosques de la CINSJP, en

sitios de campo a altitudes contrastantes (sitio bajo: Los Amoles, 19° 25' 42.1" N, 102° 09' 34.6", 2300 m; sitio alto: Cerro de Parí, 19° 28.4' N, 102° 11.0' O, 2900 m). Adicionalmente, se establecieron ensayos en condiciones óptimas de crecimiento (lo que se denomina ensayos de jardín común o en inglés "common garden tests"): en una cama elevada de crecimiento en instalaciones experimentales de la UMSNH en Morelia y en un invernadero en el Centro de Investigación Forestal en Moscow, Idaho, USA, con la colaboración del Dr. Gerald E. Rehfeldt, del USDA Forest Service.

Los ensayos anteriores revelaron lo siguiente:

- a. Las procedencias con mejor potencial de crecimiento en campo son las de la parte central de la distribución natural altitudinal de *Pinus pseudostrobus* dentro de los bosques de la CINSJP: Cerro de Tumbiscatillo (19° 27' 34.4", 102° 11' 43.3"), a 2600 m de altitud y son preferibles sobre otras procedencias del estado de Michoacán (Viveros-Viveros *et al.* 2005; 2006)
- b. La especie con mayor potencial de crecimiento es *Pinus pseudostrobus*, pero a la vez, es el más susceptible a heladas. En la situación opuesta se encuentra *Pinus hartwegii*, que, al ser originario de elevadas altitudes, tiene una elevada capacidad de resistir el daño por heladas, pero en cambio, es de muy lento crecimiento. En una situación intermedia a lo anterior se encuentra *Pinus montezumae*: es menos resistente a heladas que *P. hartwegii* y más que *P. pseudostrobus*, pero a la inversa en crecimiento: crece menos que *P. pseudostrobus* pero más que *P. hartwegii* (Viveros-Viveros *et al.* 2007).
- c. Las poblaciones de *P. pseudostrobus* se han diferenciado genéticamente a lo largo del gradiente altitudinal, como una respuesta adaptativa a evadir el daño por heladas en la parte alta de su distribución y en la parte media y baja de la distribución altitudinal, tener mayor capacidad de crecer y con ello competir con éxito. Dos poblaciones de *P. pseudostrobus* son genéticamente diferentes para caracteres cuantitativos, como es la acumulación de biomasa aérea, cuando existe una diferencia altitudinal de 300 m.

Adaptación al cambio climático

De los ensayos de campo y de jardín común anteriormente descritos y con base en modelaje del hábitat climático propicio para *P. pseudostrobus* realizado a partir de

datos del Inventario Nacional Forestal de la CONAFOR, y un modelo climático de superficie (llamado “spline” en inglés), desarrollado para el clima contemporáneo (1961-1990) y para estimaciones bajo diversos escenarios de cambio climático para la década centrada en el año 2030 y 2060 (Sáenz-Romero *et al.* 2010), se llegaron a los siguientes resultados:

- a. Debido al cambio climático, el clima propicio para *P. pseudostrobus* ocurrirá a 300 m de mayor altitud en la década centrada en el año 2030, en relación a los sitios en donde el clima que le es propicio ha ocurrido en el período de referencia (1961-1990). Esto debido a que, por cada 100 m de mayor altitud, el clima es más frío en aproximadamente 0.5 °C. Debido a que hemos estimado que la media anual de temperatura se incrementará 1.5 °C para la década centrada en el año 2030, un movimiento altitudinal de 300 m compensaría tal diferencia (Sáenz-Romero *et al.* 2010).
- b. La diferenciación genética altitudinal entre poblaciones de especies forestales se debe considerar para reacoplar las poblaciones al clima que les es propicio, en escenarios de cambio climático. Esto se puede lograr estableciendo una zonificación altitudinal para la colecta de semillas, en bandas altitudinales de 300 m de ancho. Las zonas propuestas se indican en el Cuadro 1. La sugerencia es colectar semilla en una zona determinada, producir planta en vivero y reforestar plantando en la zona altitudinal inmediata superior. Esto significaría un movimiento altitudinal hacia arriba de 300 m, y con ello se intentaría que las plantas de *P. pseudostrobus* estén adaptadas al clima futuro, al menos para la década centrada en el año 2030 (Figura 4; Sáenz-Romero *et al.* 2012).
- c. El movimiento altitudinal hacia arriba de genotipos mediante programas de reforestación, que llamamos migración asistida (las poblaciones de árboles pueden migrar por sí solas, pero requieren muchas generaciones y no hay tiempo para ello; por lo que se requiere asistencia humana), la hemos ensayado experimentalmente en los bosques de la CINSJP con *Pinus devoniana*, *P. leiophylla* y *P. pseudostrobus*. El resultado es que un movimiento hacia arriba es viable sin una pérdida importante de crecimiento, siempre y cuando no exceda de 400 m de diferencia altitudinal entre el origen de la semilla y el sitio de plantación (Castellanos-Acuña *et al.* 2015).

CUADRO 1

Límites e intervalos altitudinales y climáticos de tres zonas de semillas de *Pinus pseudostrobus*.
Modificado de Sáenz-Romero et al (2012).

Zona	Altitud (m)			Media Anual Temp. (°C)			Grados día anuales > 5°C		
	Límite (m)		Rango	Límite (m)		Rango	Límite (m)		Rango
	Inferior	Superior		Inferior	Superior		Inferior	Superior	
1	2100	2400	300	15.50	14.62	0.88	3822	3506	317
2	2400	2700	300	14.62	13.75	0.88	3506	3189	317
3	2700	3000	300	13.75	12.87	0.88	3189	2872	317

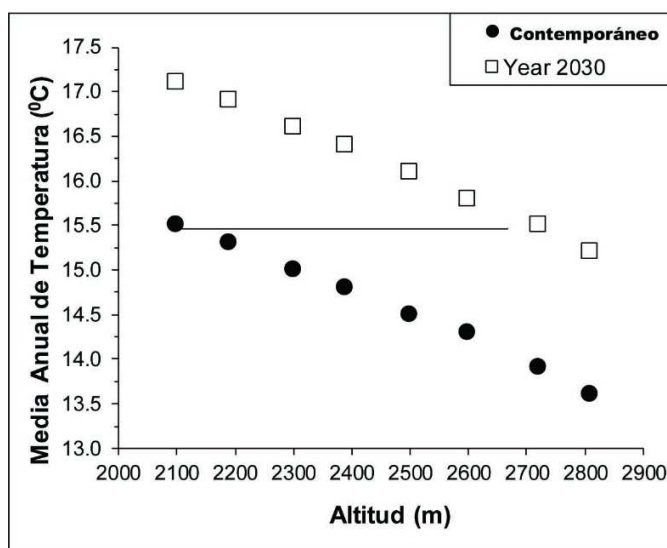


Figura 4. Media anual de temperatura para cada procedencia, bajo clima contemporáneo (1961-1990) y estimado para la década centrada en el año 2030, graficada contra la altitud de cada procedencia. La flecha indica el movimiento altitudinal hacia arriba necesario para reacoplar una población con la temperatura a la cual está adaptada, pero que ocurrirá en sitios a mayor altitud. Modificado de Sáenz-Romero et al. (2012).

- d. El modelaje del hábitat climático de *Pinus pseudostrobus* indica que el clima que le es propicio se contraerá a mayores altitudes, dejando la parte baja de la distribución de la especie sin el clima que le es propicio. Por ejemplo, para la CINSJP, el 43 % del hábitat climático propicio para esta especie se perderá para la década centrada en el año 2090 (Cuadro 2). Esto inducirá

una declinación forestal, debido a un creciente estrés por sequía en los árboles, particularmente al final de la época de estiaje (abril y mayo), seguido de una defoliación y eventualmente la muerte del arbolado. La especie afectada es la de mayor importancia ecológica y económica en la región, *P. pseudostrobus*. En cambio, *P. devoniana* (conocido como pino michoacana), que crece a menor altitud en sitios más cálidos y secos, tiene una ligera ganancia en la extensión de su hábitat climático, a costa de *P. pseudostrobus*.

CUADRO 2.

Área proyectada de hábitat climático propicio (con una probabilidad de > 50 %) para *Pinus pseudostrobus* (pino caniz) y *P. devoniana* (pino michoacana), en el área de aprovechamiento forestal de la CINSJP, para el clima contemporáneo (1961-1990) y para las décadas centrada en los años 2030, 2060 y 2090, con un escenario de concentración de gases de efecto invernadero RCP 6.0 watts/m² (escenario intermedio). El área proyectada de pérdida, permanencia y ganancia se expresa como % de cambio en comparación con el área del período 1961- 1990. Datos en preparación no publicados.

Especie	Hábitat climático (km ²)	Área proyectada a futuro (% comparado con 1961-1990)								
		Pierde			Mantiene			Gana		
		203	206	209	203	206	209	203	2060	2090
<i>P. devoniana</i>	215	0	0	0	100	100	100	4	4	4
<i>P. pseudostrob</i>	223	0	2	43	100	98	57	0	0	0

- e. El proceso de declinación forestal, aparentemente ligado al cambio climático, lo hemos observado en la Meseta Purépecha de Michoacán, en el límite altitudinal inferior de *P. pseudostrobus* (2300 m), en sitios ligeramente más pedregosos de lo usual (y por tanto con menor capacidad de retención de agua) (López-Toledo et al 2017). En esos sitios, observamos numerosos árboles defoliados y muertos en el fin de la temporada de secas en el año 2010 (Figura 5). La comunidad indígena encargada del manejo de esos sitios decidió cortar los árboles muertos y aquellos vivos pero severamente defoliados, para evitar favorecer la aparición de un brote de plagas y enfermedades, dejando el arbolado que no estaba severamente dañado y reforestando con la misma especie. Ocho años después, numerosos árboles adultos que se dejaron en el 2010 ahora

están severamente defoliados (Figura 6). Es decir, el proceso de declinación continúa.

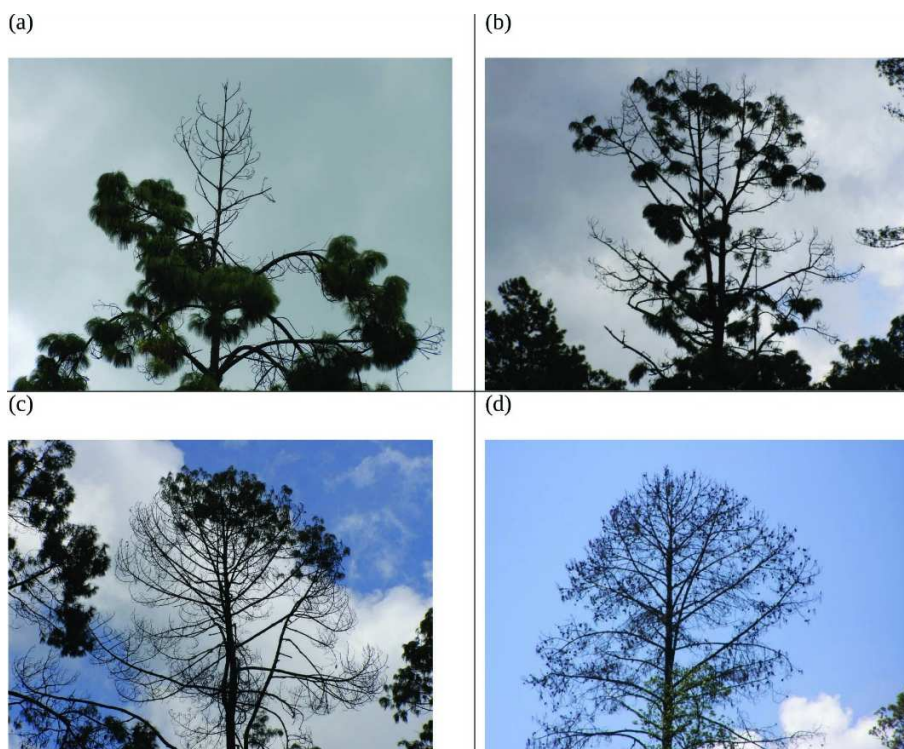


Figura 5. Árboles defoliados de *P. pseudostrobus* en la Meseta Purépecha, en el límite altitudinal inferior de esa especie (2300 m), en un sitio más pedregosos de lo usual, aparentemente debido al cambio climático. Fotografías de mayo del 2010. (a) Defoliación en la parte superior de la copa; (b) defoliación a distintas alturas de la copa; (c) defoliación de abajo hacia arriba de la copa; (d) árbol muerto por defoliación generalizada severa.

- f. Algunos árboles de *P. pseudostrobus* y *P. leiophylla* que habían logrado establecerse en un difícil proceso de sucesión primaria en los derrames de lava del Volcán Parícutín, a pesar de haber alcanzado la edad adulta, ahora están severamente defoliados o muertos, debido al creciente estrés aparentemente atribuible al cambio climático (Figura 8).

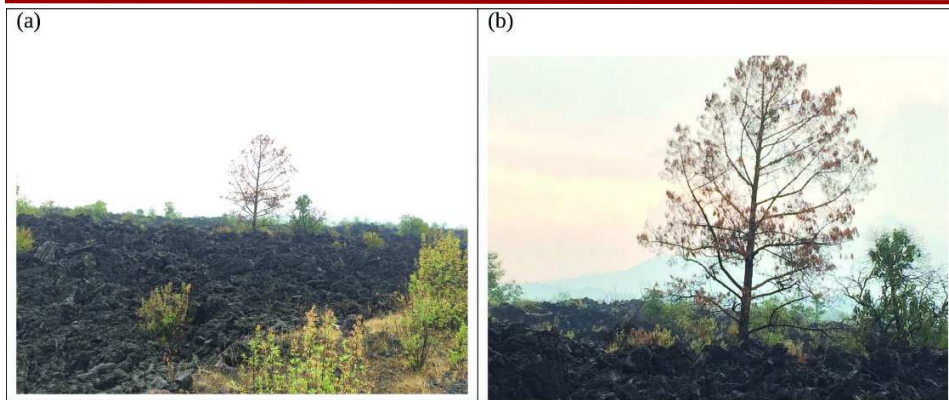


Figura 6. Árboles defoliados de *P. pseudostrobus* en el mismo sitio que en Figura 6, los cuales en el año 2010 no estaban severamente defoliados, pero ya lo están en mayo del 2018. (a) Grupo de árboles defoliados; (b) árbol muerto por defoliación generalizada severa.

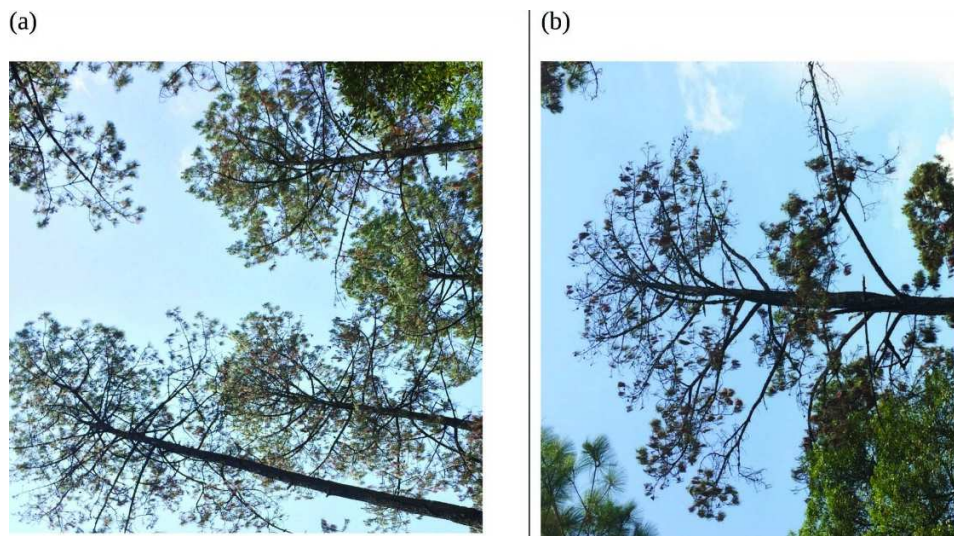


Figura 7. Árbol de pino severamente defoliado sobre el derrame de lava del Volcán Parícutín. (a) Vista general del derrame de lava, a aproximadamente 800 m de las ruinas de San Juan Parangaricutiro. (b) Acercamiento al árbol defoliado. Foto mayo 2018.

Conclusiones

No obstante el excelente manejo sustentable certificado que realiza la Dirección Técnica Forestal de la CINSJP, el efecto sobre el medio ambiente de disturbios de origen humano, como la agricultura que se practicó a principios del siglo pasado, la erupción del Volcán Parícutín y el cambio climático genera condiciones que obligan a generar nuevas estrategias de manejo de los bosques. Un factor común de todos estos tipos de disturbio es que crean condiciones de estrés hídrico, ya sea porque la ceniza volcánica tiene poca capacidad de retención de humedad y alcanza altas temperaturas por el que se impondrá durante los meses de estiaje como consecuencia del cambio climático. Mientras que la creación de arenales generó condiciones que impiden la regeneración del bosque, el estrés hídrico por el cambio climático muy probablemente generará una declinación forestal, particularmente de la especie más susceptible y también la más valiosa ecológica y económicamente: *Pinus pseudostrobus*.

Es necesario un manejo adaptativo integrado a los programas de reforestación, que considere los efectos de eventos que ocurrieron en el pasado y que crean condiciones únicas para el establecimiento de las plantas nativas y su supervivencia y que a la vez aminore los impactos esperados del cambio climático. Lo anterior se puede lograr colectando semilla local, produciendo planta en vivero y, para arenales y condiciones similares, aprovechando las especies más resistentes a las nuevas condiciones, y para enfrentar los efectos del cambio climático plantando a 300 m de mayor altitud que el origen de la semilla. Esto para compensar el incremento de temperatura de 1.5 °C previsto para el año 2030.

En aquellos parajes que corresponden al límite altitudinal inferior de la distribución natural de *Pinus pseudostrobus* (alrededor de 2200 a 2300 m de altitud), se recomienda que las reforestaciones en lo sucesivo se hagan con *P. devoniana*, que es más resistente al estrés por sequía que *P. pseudostrobus*.

Es de esperarse que la restauración ambiental en los arenales formados por la erupción del Volcán Parícutín se hará gradualmente más lenta y difícil, por estrés hídrico más severo debido al cambio climático, sumará a la ya de por sí difícil barrera que representan las condiciones físicas del sustrato. Esto a su vez sugiere que hay un período de tiempo limitado en que la restauración de estos sitios es posible sin que represente un esfuerzo y/o costos muy elevados.

Agradecimientos

Se agradece a la Dirección Técnica Forestal de la CINSJP por las facilidades y ayuda brindada en 18 años de colaboración. Se agradece el financiamiento de la Coordinación de la Investigación Científica de la UMSNH, del Fondo CONACYT-SIMORELOS (Proyecto 20000306021), del USDA-Forest Service, Rocky Mountain Research Station, Moscow, Idaho, USA (Proyecto 01-JV-11222063-183), del Fondo CONACYT-SEMARNAT (Proyecto 2002-CO1-0760), del Fondo CONACYT-CONAFOR (Proyectos CONAFOR-2002-C01-4655 y 2005-C02-14783), y del Fondo Mixto CONACYT-Michoacán (proyecto 2009-127128). Se agradece el asesoramiento de Gerald E. Rehfeldt, USDA Forest Service en Moscow, Idaho, USA. Numerosas personas, técnicos forestales y estudiantes de licenciatura de la UMSNH y de la UNAM han colaborado en los proyectos descritos.

Referencias

- Alfaro RI, Fady B, Vendramin GG, Dawson IK, Fleming RA, Sáenz-Romero C, Lindig-Cisneros R, Murdock T, Vinceti B, Navarro CM, Skråppa T, Baldinelli GK, El-Kassaby YA, Loo J. 2014. The role of forest genetic resources in responding to biotic and abiotic factors in the context of anthropogenic climate change. *Forest Ecology and Management* 333: 76-87
- Blanco-García A. y R. Lindig-Cisneros. 2005. Incorporating restoration in sustainable forestry management: Using pine bark mulch to improve native-species establishment on tephra deposits. *Restoration Ecology* 13: 703-709.
- Blanco-García, A., C. Sáenz-Romero, P. Alvarado-Sosa y R. Lindig-Cisneros. 2008. Native pine species performance in response to age at planting and mulching in a site affected by volcanic ash deposition. *New Forests* 36: 299-305.
- Castellanos-Acuña D, R. Lindig-Cisneros y C. Sáenz-Romero. 2015. Altitudinal assisted migration of Mexican pines as an adaptation to climate change. *Ecosphere* 6(1): Article 2:1-16
- Christensen N. L., Bartuska A y Brown J. 1996. The report of the Ecological Society of America Committee on the Scientific Basis for Ecosystem Management. *Ecological Applications* 6: 665–91.
- Egglar, W. A. 1948. Plant communities in the vicinity of the volcano Parícutín, Mexico, after two and a half years of eruption. *Ecology* 29:415–437.

- Eggler, W. A. 1963. Plant life of Parícutin volcano, Mexico, eight years after activity ceased. *American Midland Naturalist* 69:38–67.
- Lindig-Cisneros, R., A. Blanco-García, C. Sáenz-Romero, P. Alvarado-Sosa y N. Alexandre-Melena. 2007. Restauración adaptable en la Meseta Purépecha, Michoacán, México: hacia un modelo de estados y transiciones. *Boletín de la Sociedad Botánica de México* 80 (Suplemento): 25-31.
- Lindig-Cisneros, R., C. Sáenz-Romero, N. Alexandre, E. Aureoles, S. Galindo, M. Gómez, R. Martínez y E. Medina. 2002. Efecto de la profundidad de los depósitos de arena volcánica en el establecimiento de vegetación nativa en las inmediaciones del volcán Parícutín, México. *Ciencia Nicolaita* 31: 47-54.
- Lindig-Cisneros R, I. MacGregor-Fors, R. Ortega-Álvarez y A. Blanco-García. 2012. Restoration and the Sustainable Use of Complex Landscapes: An Integrative Conceptual Model. En: *Land Management*. Surendra Suthar (editor). Nova Science Publishers. New York, USA. pp. 113-124.
- López-Toledo L, Heredia-Hernández M, Castellanos-Acuña D, Blanco-García A. y Sáenz-Romero C. 2017. Reproductive investment of *Pinus pseudostrabus* along an altitudinal gradient in Western Mexico: implications of climate change. *New Forests* DOI 10.1007/s11056-017-9602-8
- Nava-Sosa I. J., R. Lindig-Cisneros, E. del-Val y S. I. Lara-Cabrera. 2010. Limitaciones para el establecimiento de plántulas en arenas de origen volcánico. *Boletín de la Sociedad Botánica de México* 87: 51-59.
- Sáenz-Romero, C., Rehfeldt, G. E., Crookston, N.L., Duval, P., St-Amant, R., Beaulieu, J. y Richardson, B. A. 2010. Spline models of contemporary, 2030, 2060 and 2090 climates for Mexico and their use in understanding climate-change impacts on the vegetation. *Climatic Change*. 102(3-4):595-623.
- Sáenz-Romero C., G. E. Rehfeldt, J. C. Soto-Correa, S. Aguilar-Aguilar, V. Zamarripa-Morales y López-Upton J. 2012b. Altitudinal genetic variation among *Pinus pseudostrabus* populations from Michoacan, Mexico; two location shadehouse test results. *Revista Fitotecnia Mexicana* 35: 111-120.
- Sáenz-Romero C, Rehfeldt G. E., Crookston N. L., Duval P and Beaulieu J. 2012a. Spline models of contemporary, 2030, 2060 and 2090 climates for Michoacan state, Mexico; impacts on the vegetation. *Revista Fitotecnia Mexicana* 35(4):333-345.
- Sáenz-Romero C; Lindig-Cisneros R. A.; Joyce D. G.; Beaulieu J; St-Clair JB; Jaquish BC. 2016. Assisted migration of forest populations for adapting trees to climate change (Migración asistida de las poblaciones forestales para la

- adaptación de árboles ante el cambio climático). Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente 22: 303 - 323.
- Viveros-Viveros, H., C. Sáenz-Romero, J. López-Upton y J. J. Vargas-Hernández. 2007. Growth and frost damage variation among *Pinus pseudostrabus*, *P. montezumae* and *P. hartwegii* tested in Michoacán, México. Forest Ecology and Management 253:81-88.
- Viveros-Viveros, H., C. Sáenz-Romero, J. J. Vargas-Hernández, y J. López-Upton. 2006. Variación entre procedencias de *Pinus pseudostrabus* establecidas en dos sitios en Michoacán, México. Revista Fitotecnia Mexicana 29(2):121-126.
- Viveros-Viveros, H., C. Sáenz-Romero, J. López-Upton y J. J. Vargas-Hernández. 2005. Variación genética altitudinal en el crecimiento de plantas de *Pinus pseudostrabus* Lindl. en campo. Agrociencia 39(5):575-587.
- Young, T. P., J. M. Chase y R. T. Huddleston. 2001. Community Succession and Assembly Comparing, Contrasting and Combining Paradigms in the Context of Ecological Restoration. Ecological Restoration 19: 5-18.