

ESPECIES NATIVAS PARA MANEJO DE LA EROSIÓN DE SUELOS EN LA REGIÓN MIXTECA ALTA, OAXACA¹

[NATIVE SPECIES FOR SOIL EROSION MANAGEMENT IN THE MIXTECA ALTA REGION, OAXACA]

José Antonio Hernández-Aguilar¹, Williams Hernández-Gómez¹; Rigoberto González-Cubas^{1§}

¹Tecnológico Nacional de México. Instituto Tecnológico Superior de San Miguel el Grande. Km 1.2 carretera a Morelos, San Miguel el Grande, Tlaxiaco, Oaxaca. C.P.71140. [§]Autor para correspondencia: (rigoberto.gc@smiguelgde.tecnm.mx).

RESUMEN

La restauración de áreas degradadas y la erosión del suelo es un asunto de interés local, nacional y global, particularmente porque implican una dimensión social (servicios de provisión). Particularmente estos fenómenos se presentan en la región Mixteca Alta, en Oaxaca, donde por siglos han sido sometidas a sobrepastoreo y deforestación. Para revertir esta situación se han llevado a cabo reforestaciones con especies inducidas de pinos. En este contexto, el objetivo del estudio fue analizar el potencial de las especies nativas para controlar y manejar la erosión en cinco comunidades de la Mixteca Alta. Se realizaron recorridos de campo y clasificación de imágenes satelitales para identificar los sitios con erosión y la distribución de cobertura forestal. Adicionalmente, se realizaron organizados cinco talleres y entrevistas semi-estructuradas con líderes y personas de la comunidad para documentar el estado de las reforestaciones y el conocimiento local sobre especies nativas con potencial para restaurar. Se encontró que el 37.5% del sitio de estudio cuenta con superficie forestal y que cerca del 10% registra algún grado de erosión. Ante este panorama, se identificaron una serie de especies arbustivas y arbóreas nativas no maderables (*Acacia* spp., *Arbutus* spp., *Barkleyanthus* spp., *Cercocarpus* spp., *Dodonaea* spp., *Juniperus* spp.) que pueden ser útiles conforme el grado de erosión que presenten los terrenos a reforestar. Esta información será útil para futuros planes de restauración basados en propagación y reproducción de especies nativas en regiones degradadas.

Palabras clave: especies arbustivas, políticas forestales, recuperación de áreas degradadas, reforestaciones.

ABSTRACT

The restoration of degraded areas and soil erosion is a matter of local, national and global interest, particularly because it involves a social dimension (provisioning services). These phenomena are particularly present in the Mixteca Alta region of Oaxaca, which for centuries has been subjected to overgrazing and deforestation. Reversing this situation has led to reforestation with induced pine species. In this context, the objective of the study was to analyze the potential of native species to control and manage erosion in five communities of the Mixteca Alta. Field surveys and satellite image classification were carried out to identify erosion sites and the distribution of forest cover. In addition, five workshops and semi-structured interviews were conducted with community leaders and individuals to document the status of reforestations and local knowledge about native species with restoration potential. It was found that 37.5% of the study site is forested and that about 10% shows some degree of erosion. Given this situation, a series of native non-timber shrub and tree species were identified (*Acacia* spp., *Arbutus* spp., *Barkleyanthus* spp., *Cercocarpus* spp., *Dodonaea* spp., *Juniperus* spp.) that could be useful according to the type of erosion on the land to be reforested. This information will be useful for future restoration plans based on propagation and reproduction of native species in degraded regions

Index words: shrub species, forestry policies, degraded land recovery, reforestation.

INTRODUCCIÓN

Las estrategias contra la erosión y la desertificación es un asunto prioritario en la agenda medioambiental nacional y mundial (Paganos *et al.*, 2020). La FAO (2019) señala que esta condición representa la mayor amenaza global para las funciones del suelo lo que pone en riesgo la seguridad alimentaria, la calidad del agua y la mitigación del cambio climático. La erosión de suelo es el proceso de eliminación de la capa superior de la superficie terrestre (Pennock *et al.*, 2015). Resultado de la interacción de factores ambientales, como el tipo de suelo (Martínez-Santiago *et al.*, 2015), la topografía, la escorrentía, el viento, y de factores humanos, como la deforestación, el sobrepastoreo y prácticas agrícolas inadecuadas (INEGI, 2014; Bolaños-González *et al.*, 2016). La erosión provoca pérdida de las propiedades físico-químicas y biológicas del suelo, que tiene implicaciones directas en la productividad agrícola y forestal (Pimentel *et al.*, 1995; Oldeman, 1998, Boardman *et al.*, 2003; Zhou *et al.*, 2008). En México, las principales pérdidas de suelo superficial se deben a la erosión hídrica (37%) y erosión eólica (14.9%), solo el 36% de la superficie se encuentra sin algún tipo de degradación. De acuerdo con datos reportados en la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) (2004), la degradación de suelo a nivel nacional es 30.9% moderada, 19.6% ligera, 12.6% severa y 0.9% extrema.

La degradación del paisaje es una condición que implica una reducción de la calidad de los atributos físicos, biológicos y sociales de un territorio. Este cambio negativo es causado principalmente por actividades humanas y en menor medida a factores naturales (Groves, 1998, Reynolds *et al.*, 2007; Právělie, 2021). En caso particular de áreas forestales degradadas no solo se ven afectados en sus componentes biológicos, sino también en elementos físicos como el suelo y el relieve. De la misma forma, la degradación a nivel de paisaje tiene implicaciones en la esfera social, lo que se traduce en menor productividad de tierras agrícolas y forestales y la disponibilidad de agua para consumo (Simpson *et al.*, 2001; Agnoletti, 2007; Sandoval-García *et al.*, 2021).

En la Mixteca Alta, se han hecho numerosos estudios que tienen que ver con reforestaciones de especies maderables principalmente como *Pinus greggii* Engelm ex Parl, y *P. oaxacana* Mirov (López *et al.*, 2004; Ortiz-Mendoza *et al.*, 2021; Ramírez-López *et al.*, 2011). Estos estudios mostraron que la tasa de supervivencia de las especies inducidas es menor al 80% después de 10 años de ser plantadas. Sin embargo, dichos estudios no toman en cuenta el valor ecológico de la vegetación nativa, como un elemento clave no solo evitar la pérdida de suelo, sino también para promover la regeneración natural. Bajo este escenario, es pertinente la evaluación a nivel local y regional de la erosión del suelo con el objetivo de identificar y recomendar grupo de especies locales no maderables con potencial para la recuperación de áreas degradadas y suelos altamente erosionados en la Mixteca Alta, Oaxaca, México.

MATERIALES Y MÉTODOS

Sitio de estudio

El estudio se llevó a cabo en el Geoparque “Mixteca Alta”, denominación otorgada en 2016 por la UNESCO por la peculiaridad geológica del sitio, reconocido mundialmente por su alto grado de degradación del suelo (Palacio-Prieto *et al.*, 2016). Se ubica al noroeste del Estado de Oaxaca, comprende 41,540 ha que presenta un gradiente de elevación de 2000-2800 m y abarca 15 comunidades. La investigación se centró en cinco comunidades representativas (16,969 ha) conforme al gradiente de elevación del Geoparque: 1. Santo Domingo Tonaltepec, Santo Domingo Yanhuitlán, San Pedro Añañe, Santa María Suchixtlán y Santa María Tiltepec (Figura 1). En todas ellas se reconocen remanentes de bosque templado de pino-encino-enebro.

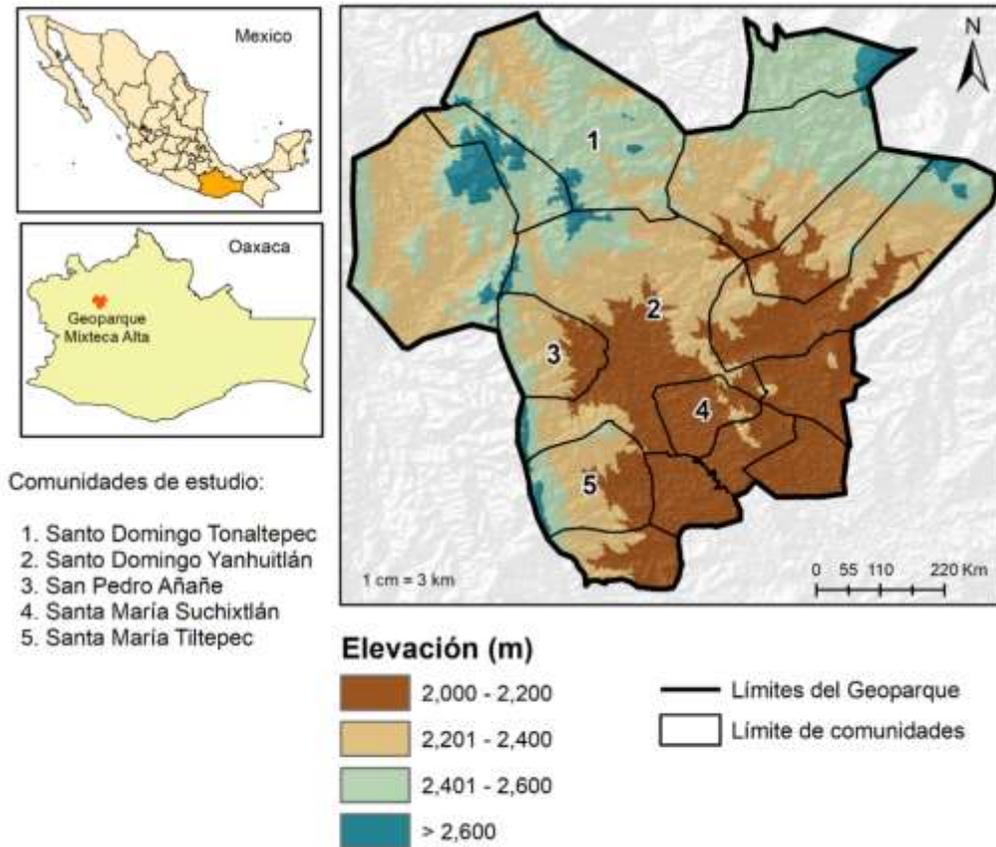


Figura 1. Localización del sitio de estudio.

Análisis cartográfico

En cada comunidad se organizó un taller de mapeo participativo usando como referente el polígono del predio (RAN, 2017) y el mapa topográfico oficial (INEGI, 2015). Estuvieron presentes autoridades agrarias y municipales (± 12 personas). A través de un mapeo participativo propuesto por Chambers (2006), los participantes identificaron sitios relacionados con sus recursos forestales, áreas de reforestación, parajes con diferentes tipos de erosión y sitios donde se reconoce recuperación natural. En recorridos de campo se obtuvo información georreferenciada de 275 puntos sobre coberturas forestales y usos de suelo.

Posteriormente, se analizaron imágenes satelitales (Sentinel-II de 2018) para identificar áreas vegetación y sin vegetación aparente con la información del mapeo participativo y la información georreferenciada. Se reconocieron a través de una clasificación supervisada con el software ArcMap 12.0 tres categorías: 1. Cobertura forestal. Comprende bosque maduro, vegetación secundaria arbórea y matorrales. 2. Sin vegetación aparente. Superficie que no cuenta con ningún tipo de vegetación leñosa. Comprende principalmente tierras agrícolas, asentamientos humanos y cuerpos de agua. 3. Áreas erosionadas. Superficie que presenta algún grado de erosión de suelo.

El mapa de coberturas fue verificado a través de la selección de una muestra por conglomerados (Mas *et al.*, 2003), que consistió en tomar 120 puntos con GPS (Garmin) (40 para cada clase) para corroborar que la cobertura representada coincidió con lo existente en campo, teniendo una precisión del 85% de las clases

representadas en el mapa. Asimismo, la información de mapa de cobertura sirvió para elaborar un mapa de superficie forestal y superficie erosionada por comunidad.

Análisis de especies nativas no maderables

En cada comunidad se aplicaron entrevistas informales (± 6 personas) a habitantes locales, quienes narraron aspectos sobre reforestaciones y regeneración natural en los últimos 30 años. Adicionalmente, se organizaron cinco entrevistas semi-estructuradas grupales en talleres, donde participaron 35 informantes clave de las comunidades (líderes y autoridades mayores de 50 años), las cuales se centraron en tres elementos: 1. Estado de las reforestaciones. 2. Estado de la regeneración natural 3. Especies nativas con potencial para restauración.

Con la información de las entrevistas y los recorridos de campo, se realizó un listado de las especies nativas dominantes y especies vegetales asociadas que se recomienda para programas de reforestación. Posteriormente, esta lista de especies locales se clasificó a través de un cuadro considerando tres grados de erosión. Para catalogar el grado de erosión se consideró la pérdida de suelo en las formaciones litológicas (Fernández de Castro-Martínez *et al.*, 2018). Se etiquetó como erosión severa a las cárcavas (formación Yanhuítlán), a la erosión de tipo laminar se le clasificó como moderada (toba “Llano de Lobos”) y a la erosión en surcos como baja (andesita “Yucudaac”).

RESULTADOS

Estado de la cobertura forestal y la erosión de suelo

El análisis de imágenes satelitales mostró que 37.5% de la superficie total del sitio cuenta cobertura forestal, que corresponde principalmente a bosque maduro, bosque secundario y matorrales (Figura 2). La comunidad con mayor superficie forestal fue Santa María Tiltepec (56.1%) y la que menor registró tuvo fue Santa María Suchixtlán (17.2%) (Cuadro 1). Respecto al tipo de vegetación dominante por comunidad, se identificó que Santo Domingo Yanhuítlán y Santa María Tiltepec son las comunidades que registraron mayor superficie de bosques maduro. En Santa María Suchixtlán obtuvo el mayor registro de matorrales respecto al resto de las comunidades.

Se estimó que cerca de 10% (1,624.4 ha) de la superficie total de sitio de estudio presenta algún grado de erosión (Figura 2). Se observaron que los suelos erosionados se ubican principalmente en cárcavas, barrancas y lomeríos. Santo Domingo Tonaltepec es la comunidad con mayor erosión que presentó el 18% de la superficie total en esta condición (Cuadro 1).

La región Mixteca Alta históricamente ha presentado avanzados procesos de degradación forestal, erosión de suelos y deforestación. Con el establecimiento de los primeros agricultores sedentarios alrededor del año 4000 a.C., la región registró las primeras modificaciones antrópicas que consistieron en la remoción de vegetación y la construcción de *lama-bordos* (terrazas agrícolas) (Mueller *et al.*, 2012).

Conforme la literatura, los bosques de la Mixteca podrían haber presentado notables modificaciones a partir del periodo prehispánico postclásico (900 d.C.) debido al crecimiento de la población y la ampliación del sistema de lama-bordos (Spores y Balkansky 2013; Borejsza y Joyce, 2016); sin embargo, se ha documentado que el sistema de terrazas agrícolas ayudó a la retención de suelo (Guerrero-Arenas *et al.*, 2010; Rodríguez y Anderson, 2013).

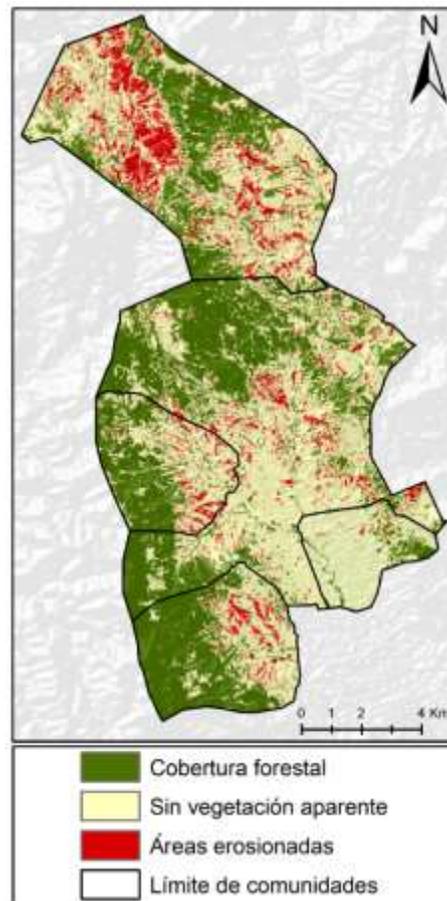


Figura 2. Cobertura forestal, cobertura sin vegetación aparente y áreas erosionadas en las comunidades del sitio de estudio. Fuente: elaboración propia.

Cuadro 1. Superficie forestal, vegetación dominante y superficie erosionada por comunidad.

Comunidad	Superficie forestal (ha)	Tipo de vegetación dominante	Superficie erosionada (ha)
Santo Domingo Yanhuatlán	2,763 (39.4*)	Bosque maduro	399.1 (5.7*)
San Pedro Añañe	737 (44.9)	Bosque secundario	122.7 (7.5)
Santa María Suchixtlán	179 (17.2)	Matorrales	37.3 (3.6)
Santo Domingo Tonaltepec	1,485 (28.8)	Bosque secundario	929.8 (18.0)
Santa María Tiltepec	1,186 (56.1)	Bosque maduro	135.5 (6.4)

* Representa el porcentaje.

La sobreexplotación forestal en la época colonial indujo a que los bosques experimentaran severa degradación y deforestación; mientras que, con la introducción del ganado caprino, el pastoreo propicio

erosión del suelo (García, 1996; Díaz-Núñez, 2006), evidente hasta ahora. En la época contemporánea, la migración económica de mixtecos que inició a mediados del siglo XX (Rivera-Salgado, 2005), redujo la actividad agrícola, lo que afectó negativamente al sistema tradicional de terrazas haciendo más propenso el suelo a la erosión hídrica (García-Barrio y García-Barrios, 1990; Velásquez, 2002). A inicios del presente siglo, tanto la migración económica y el pastoreo de ganado caprino todavía persisten en la mayoría de las comunidades de la Mixteca, aunque con diferente magnitud (Hernández-Aguilar *et al.*, 2017).

El análisis del estado de la cobertura forestal y de las áreas erosionadas puede ser útil para la toma de decisiones dentro de las comunidades de estudio, considerando que recientemente se ha reportado que la cobertura forestal ha incrementado en las últimas décadas en la zona del Geoparque de la Mixteca Alta (Lorenzen *et al.*, 2020; Hernández-Aguilar *et al.*, 2021). Tanto la regeneración natural como aquella que es inducida (reforestaciones), pueden ser benéficas para la conservación de suelos en la Mixteca Alta, sin embargo, ambas dependen de factores ambientales, sociales e institucionales para su éxito.

Situación de las acciones de conservación y restauración de suelos en la Mixteca Alta

De acuerdo con las autoridades agrarias locales, los programas de reforestaciones y conservación de suelos de la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR) han sido la principal estrategia para frenar la erosión de suelos en la Mixteca Alta. Desde finales de la década de los noventa y principios del presente siglo, un gran número de comunidades del sitio de estudio y lugares cercanos han realizado campañas de reforestación bajo los términos o reglas de operación de las instituciones públicas. Generalmente, los programas de reforestación se han centrado en la siembra de árboles del género *Pinus*, principalmente con especies como *greggii* y *pseudostrobus* (*var. oaxacana*), en parajes adyacentes a remanentes de bosques, parajes con tierras agrícolas abandonadas, y en áreas con algún grado de erosión de suelo.

La reforestación con pino presenta los siguientes problemas de acuerdo con la percepción de la gente: 1. El desarrollo de los árboles es lento por falta de materia orgánica en el suelo y obras de captación de agua (Figura 3). 2. La supervivencia de pinos es nula o escasa en terrenos con un grado de erosión severo (Figura 3). 3. Una parte de las plántulas de las especies de pino que otorga la CONAFOR no se adaptan a las condiciones biofísicas de las comunidades. Además de estas desventajas, las reforestaciones con una sola especie de árbol implican menor diversidad arbórea, que en términos ecológicos vuelve susceptible al bosque ante amenazas bióticas como lo es el escarabajo descortezador (Duran *et al.*, 2018).

Los problemas en reforestaciones de programas gubernamentales en las comunidades de estudio coinciden con otros trabajos que revelaron que plantaciones forestales con especies inducidas en la Mixteca Alta no ha sido exitosa debido a factores como la precipitación media anual, la temperatura media anual, la altitud y el tipo del suelo (López *et al.*, 2011; Plancarte, 2019). Por lo anterior, es necesaria una evaluación integral de los programas de reforestación de la CONAFOR, los cuales se han centrado en plantaciones comerciales con especies de pinos, principalmente no nativos (Burney *et al.*, 2015); sin considerar el potencial especies nativas con fines de restauración forestal y de suelos. Asimismo, los actuales programas de reforestación aparentemente no fueron diseñados para comunidades/ejidos forestales que no buscan un aprovechamiento comercial del bosque, sino conservar/aprovechar otros servicios ecosistémicos como el ecoturismo, productos no maderables o fertilidad del suelo (Hernández-Aguilar *et al.*, 2021).

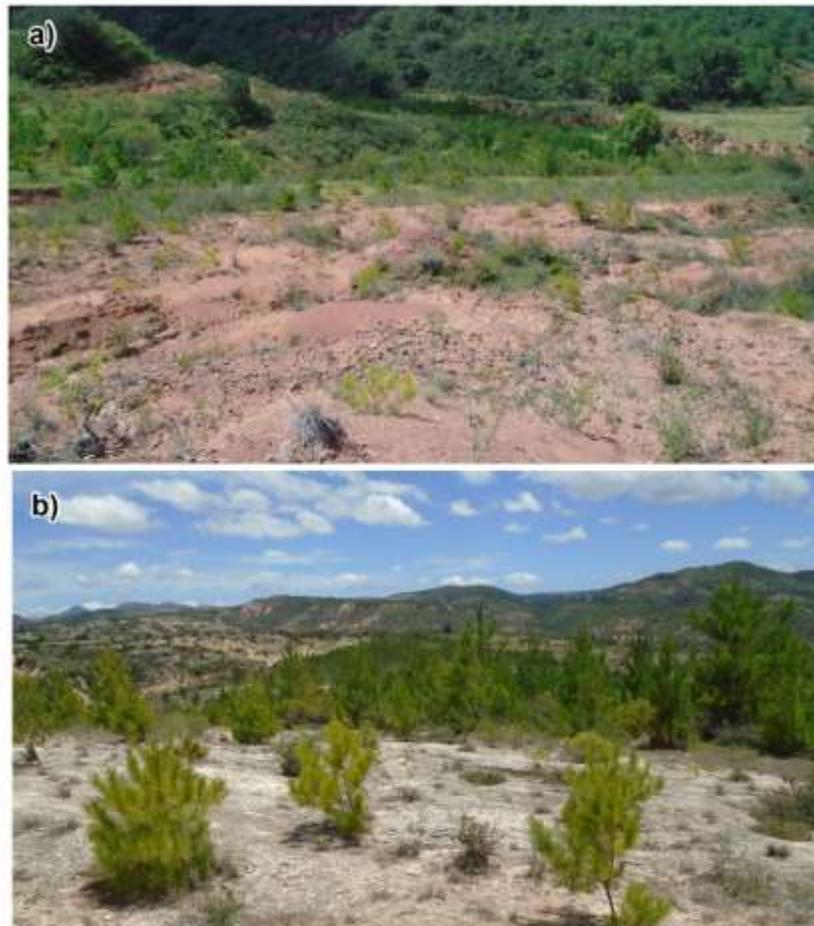


Figura 3. Reforestaciones en comunidades de Geoparque: a) sitios severamente erosionados y b) terrenos con erosión moderada. Fuente: elaboración propia.

Estrategia de reforestación con especies nativas

Conforme a la experiencia y observación de las personas entrevistadas, existen diversas especies nativas no maderables que pueden ser utilizadas de acuerdo con el grado de erosión en el que se encuentre el sitio a intervenir. Se identificaron asociaciones de especies arbóreas nativas que podrían ser utilizadas para los programas de reforestación; en función al tipo de terreno y al grado de erosión del sitio.

En sitios con erosión severa, como las cárcavas de formación Yanhuatlán, se observó que el ramón (*Cercocarpus* spp.) se ha distribuido naturalmente en este tipo de suelos (Cuadro 2 y Figura 4), y se reporta en la literatura que esta especie nativa se distribuye naturalmente en todo tipo de terrenos (Villaseñor, 2016). Además, se desarrollan en terrenos con pendiente pronunciada, cualidad que difícilmente no se ha logrado observar en las reforestaciones con pino. La distribución de ramón comúnmente es acompañada de pingüica (*Arctostaphylos* spp.) (Cuadro 2).

Cuadro 2. Especies nativas con potencial para manejo de la erosión de suelo.

Grado de erosión	Tipo de erosión	Sitios de muestreo	Especies nativas dominantes	Especies vegetales asociadas	Estado de las reforestaciones
Severa	Cárcavas	23	Ramón o ramonal (<i>Cercocarpus</i> spp.)	Pingüica (<i>Arctostaphylos</i> spp.)	Nula o escasa supervivencia de plántulas
Moderada	Laminar	19	Ramón (<i>Cercocarpus</i> spp.), Tepehuaje (<i>Acacia acapulcensis</i>), enebro (<i>Juniperus</i> spp.)	Pingüica (<i>Arctostaphylos</i> spp.), madroño (<i>Arbutus xalapensis</i>)	Lento crecimiento de árboles
Baja	Surcos	31	Ramón (<i>Cercocarpus</i> spp.), tepehuaje (<i>A. acapulcensis</i>), enebro (<i>Juniperus</i> spp.), elite (<i>Alnus acuminata</i>), “encino” (<i>Quercus</i> spp.) y pino (<i>Pinus</i> spp.)	Pingüica (<i>Arctostaphylos</i> spp.), madroño (<i>A. xalapensis</i>), jarilla (<i>Dodonaea viscosa</i>), chamizo (<i>Barkleyanthus salicifolius</i>)	Desarrollo normal de arboles



Figura 4. Especies nativas sitios: a) ramón (*Cercocarpus* spp.), y b) regeneración natural en cárcavas. Fuente: elaboración propia.

En sitios donde la pérdida de suelos es moderada (formaciones litológicas como tobas y andesitas) (Fernández de Castro-Martínez *et al.*, 2018) es factible trabajos de reforestación con las especies arbóreas tales como ramón (*Cercocarpus* spp.), enebro (*Juniperus* spp.) y tepehuaje (*A. acapulcensis*) (Cuadro 2). Esta última es resistente a sequías y su desarrollo no requiere suelos profundos (Pennington, 2005). En comunidades como Suchixtlán y San Pedro Añãne, se han presentado procesos de revegetación natural en terrenos con erosión, donde en un lapso de 10 a 15 años han transitado a matorrales y que cuenta con abundancia de especies arbóreas ramón, enebro y tepehuaje (Figura 4b) (Hernández-Aguilar *et al.*, 2021). Esto demuestra que en terrenos donde la erosión de suelo es moderada y con poca pendiente el desarrollo de estas especies nativas es viable.

Los sitios con erosión baja pueden albergar una mayor diversidad de especies arbóreas debido a regularmente cuenta con una calidad de suelo adecuada. Además, árboles propuestos anteriormente (ramón, enebro y tejahuaje), es posible incluir en las reforestaciones especies de elite (*A. acuminata*), encino (*Quercus* spp.) y pino (*Pinus* spp.) (Cuadro 2). Otras especies vegetales, principalmente arbustivas, tales como pingüica (*Arctostaphylos* spp.), madroño (*A. xalapensis*), jarilla (*D. viscosa*) y chamizo (*B. salicifolius*), también se adaptan exitosamente a terrenos con condiciones de erosión baja.

Considerando que en la Mixteca Oaxaqueña el 80% de sus suelos se encuentra afectado por la erosión hídrica (Martínez-Peña, 1988; Martínez *et al.*, 2006) y que cerca del 45% de las tierras presentan erosión alta, 38% erosión moderada y 17% signos de erosión severa, la propagación de especies nativas con potencial de conservación de suelos y manejo de la erosión en la Mixteca Alta requiere una revisión que las reglas de operación de CONAFOR para que sean considerados los conocimientos locales sobre especies nativas. Asimismo, es indispensable destinar recursos públicos y privados para el asesoramiento técnico y la creación de viveros comunitarios. Finalmente, las estrategias de restauración de áreas degradadas y erosionadas pueden ser exitosas si se apoyan en la base social de las comunidades, como caso es el Mixteca Alta donde por varias décadas ha operado el trabajo comunitario, las reglas de uso y acceso al bosque y el control del pastoreo (Hernández-Aguilar *et al.*, 2017, Hernández-Aguilar *et al.*, 2021).

CONCLUSIONES

Para mitigar la deforestación y la degradación y pérdida de suelos, es fundamental la diversificación de especies nativas para acciones de restauración de paisajes. Es necesario incluir en los programas de reforestación especies nativas locales, las cuales tienen mayor probabilidad de adaptación a las condiciones biofísicas de los diferentes sitios del territorio. El caso de la Mixteca Alta mostró que los actuales programas de reforestación basados en especies no nativas de pino no han sido totalmente exitosos, por lo que es recomendable dirigir los esfuerzos de restauración con especies arbóreas y arbustivas nativas.

LITERATURA CITADA

- Agnoletti, M. 2007. The degradation of traditional landscape in a mountain area of Tuscany during the 19th and 20th centuries: implications for biodiversity and sustainable management. *Forest Ecology and Management* 249(1-2): 5-17. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2007.05.032>.
- Boardman, J., J. Poesen and R. Evans. 2003. Socio-economic factors in soil erosion and conservation. *Environmental Science & Policy* 6(1): 1-6. [https://doi.org/10.1016/S1462-9011\(02\)00120-X](https://doi.org/10.1016/S1462-9011(02)00120-X).
- Bolaños-González, M.A., F. Paz-Pellat, C. Gaistardo, O. Carlos, J.A. Argumedo-Espinoza, V.M. Romero-Benítez y J.C. de la Cruz Cabrera. 2016. Mapa de erosión de los suelos de México y posibles implicaciones en el almacenamiento de carbono orgánico del suelo. *Terra Latinoamericana* 34(3): 271-288. [En línea]. [Fecha de consulta: 21 de mayo de 2021]. <https://www.redalyc.org/pdf/573/57346617003.pdf>.
- Borejsz, A. and A. Joyce. 2016. Convergence and divergence as problems of explanation in land use histories: two Mexican examples. *The Archaeology of Human-Environment Interactions* 39-71. Routledge, New York. <https://doi.org/10.4324/9781315697697>.

- Burney, O., A. Aldrete, R. Álvarez-Reyes, J.A. Prieto-Ruíz, J.R. Sánchez-Velázquez and J.G. Mexal. 2015. Mexico—Addressing challenges to reforestation. *Journal of Forestry* 113(4): 404-413. <https://doi.org/10.5849/jof.14-007>.
- Chambers, R. 2006. Participatory mapping and geographic information systems: whose map? Who is empowered and who disempowered? Who gains and who loses? *The Electronic Journal of Information Systems in Developing Countries* 25(1): 1-11. <https://doi.org/10.1002/j.1681-4835.2006.tb00163.x>.
- Díaz-Núñez, L.G. 2006. La presencia itinerante de los dominicos en Oaxaca y la Mixteca durante los siglos XVI al XVII. En: Escamilla, R.O. and I.O. Castro (Eds.), *Ñuu Savi. La Patria Mixteca*. Universidad Tecnológica de la Mixteca, México. pp. 87-156.
- Durán, E., F. Gumeta-Gómez y L. Olguín-Hernández. 2018. El manejo comunitario en paisajes forestales. En: S. Avila y M. Perevotikova (Eds). *Sistemas socio-ecológicos: marcos analíticos y estudios de caso en Oaxaca, México*. UNAM.
- Fernández de Castro-Martínez, G., L. Vázquez-Selem, J.L. Palacio-Prieto, A. Peralta-Higuera y A. García-Romero. 2018. Geomorfometría y cálculo de erosión hídrica en diferentes litologías a través de fotogrametría digital con drones. *Investigaciones geográficas* (96): 0-0. <https://doi.org/10.14350/rig.59548>.
- García, A. 1996. La caprinocultura en la Mixteca oaxaqueña. *Orígenes. Ciencias* 44: 28-31. [En línea]. [Fecha de consulta: 10 de mayo de 2021]. Disponible en: <https://www.revistacienciasunam.com/images/stories/Articles/44/CNS04405.pdf>.
- García-Barrios, R. and L. García-Barrios. 1990. Environmental and technological degradation in peasant agriculture: A consequence of development in Mexico. *World Development* 18(11): 1569-1585. [https://doi.org/10.1016/0305-750X\(90\)90044-X](https://doi.org/10.1016/0305-750X(90)90044-X).
- Groves, R.H. 1998. Ecological indicators of landscape degradation. In: Rundel P.W., Montenegro G., Jaksic F.M. (eds) *Landscape Disturbance and Biodiversity in Mediterranean-Type Ecosystems. Ecological Studies (Analysis and Synthesis)*. Vol. 136. Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-662-03543-6_3.
- Guerrero-Arenas, R., E. Jiménez-Hidalgo y H. Santiago-Romero. 2010. La transformación de los ecosistemas de la Mixteca Alta oaxaqueña desde el Pleistoceno Tardío hasta el Holoceno. *Ciencia y Mar* 14(40): 61-68. [En línea]. [Fecha de consulta: 20 de mayo de 2021]. Disponible en: <https://biblat.unam.mx/hevila/Cienciaymar/2010/no40/4.pdf>.
- Hernández-Aguilar, J.A., E. Durán, W. de Jong, A. Velázquez and G. Pérez-Verdín. 2021. Understanding drivers of local forest transition in community forests in Mixteca Alta, Oaxaca, Mexico. *Forest Policy and Economics*. In press.
- Hernández-Aguilar, J.A., H.S. Cortina-Villar, L.E. García-Barrios and M.Á. Castillo-Santiago. 2017. Factors limiting formation of community forestry enterprises in the Southern Mixteca region of Oaxaca, Mexico. *Environmental Management* 59(3): 490-504. <https://doi.org/10.1007/s00267-017-0821-8>.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). 2014. Guía para la interpretación de la cartografía de erosión del suelo escala 1: 250 000 Serie I. INEGI. [En línea]. [Fecha de consulta: 20 de marzo de 2021]. https://www.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/nueva_estruc/702825076221.pdf.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). 2015. Carta topográfica. Escala 1:50 000. Instituto Nacional de Estadística y Geografía, México. [En línea]. [Fecha de consulta: 22 de marzo de 2021]. <https://www.inegi.org.mx/app/mapas/>.
- López, U.J., C. Ramírez H., O. Plascencia y J. Jasso. 2004. Variación en crecimiento de diferentes poblaciones de las dos variedades de *Pinus greggii*. *Revista Agrociencia* 38(4): 457-464. [En línea]. [Fecha de consulta: 25 de abril de 2021]. Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=30200409&iCveNum=1109>.

- Lorenzen, M., Q. Orozco-Ramírez, R. Ramírez-Santiago and G. Garza. 2020. Migration, socioeconomic transformation, and land-use change in Mexico's Mixteca Alta: Lessons for forest transition theory. *Land Use Policy* 95: 104580. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2020.104580>.
- Martínez, J. 2006. Manejo del agua y restauración productiva en la región indígena mixteca de Puebla y Oaxaca: resultados de los estudios y recomendaciones para los tomadores de decisiones de las comunidades y organizaciones de la sociedad civil. Banco Mundial. México. [En línea]. [Fecha de consulta: 15 de abril de 2021]. Disponible en: http://centro.paot.org.mx/documentos/bm/man_agua_res_pro.pdf.
- Martínez-Peña, G.T. 1988. Aplicación de la metodología de cartografía de la erosión hídrica con enfoque geodinámico en la Mixteca Alta de Oaxaca, área de Chazumba. Tesis. México, Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo. 180 p.
- Martínez-Santiago, J., A.L. Licona-Vargas, M.V. González-Santiago, A. Becerra-Moreno, E.A. Pérez-Godínez y E. Atlán-Martínez. 2015. Diagnóstico de la degradación de la tierra en la microcuenca del Yute Ndaa, Ñuu Ndeku, Ñuu Savi, Oaxaca. *Revista de Geografía Agrícola* (55). [En línea]. [Fecha de consulta: 15 de abril de 2020]. Disponible en: <https://www.redalyc.org/pdf/757/75749286002.pdf>.
- Mas, J.F., J. Reyes Díaz-Gallegos y A. Pérez-Vega. 2003. Evaluación de la confiabilidad temática de mapas o de imágenes clasificadas: una revisión. *Investigaciones geográficas* (51): 53-72. [En línea]. [Fecha de consulta: 10 de enero de 2021]. Disponible en: <http://www.scielo.org.mx/pdf/igeo/n51/n51a5.pdf>.
- Mueller, R.G., A.A. Joyce and A. Borejsza. 2012. Alluvial archives of the Nochixtlan valley, Oaxaca, Mexico: age and significance for reconstructions of environmental change. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 321: 121-136. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2012.01.025>.
- Oldeman, L.R. 1988. Guidelines for general assessment of the status of human-induced soil degradation. Wageningen: ISRIC. [En línea]. [Fecha de consulta: 10 de febrero de 2021]. Disponible en: https://www.isric.org/sites/default/files/isric_report_1988_04.pdf.
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). 2019. Global Symposium on soil erosion. FAO, Rome. Outcome Document. [en línea]. [Fecha de consulta: 08 de mayo de 2021]. Disponible en: <http://www.fao.org/3/ca5697en/ca5697en.pdf>.
- Ortiz-Mendoza, R., O.A. Aguirre-Calderón, M. Gómez-Cárdenas, E.J. Treviño-Garza y M.A. González-Tagle. 2021. Crecimiento de procedencias de *Pinus greggii* Engelm ex Parl. en suelos degradados de la Mixteca Alta, Oaxaca. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 12(64). <https://doi.org/10.29298/rmcf.v12i64.710>.
- Palacio-Prieto, J.L., E. Rosado-González, X. Ramírez-Miguel, O. Oropeza-Orozco, S. Cram-Heydrich, M.A. Ortiz-Pérez, J.M. Figueroa-Mah-Eng and G. Fernández de Castro-Martínez. 2016. Erosion, culture and geoheritage; the case of Santo Domingo Yanhuitlán, Oaxaca, México. *Geoheritage* 8(4): 359-369. <https://doi.org/10.1007/s12371-016-0175-2>.
- Panagos, P., P. Borrelli y D. Robinson. 2020. FAO calls for actions to reduce global soil erosion. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change* 25(5): 789-790. <https://doi.org/10.1007/s11027-019-09892-3>.
- Pennington, T.D. 2005. Árboles tropicales de México: manual para la identificación de las principales especies. UNAM. 523 p.
- Pennock, D., N. McKenzie y L. Montanarella. 2015. Status of the world's soil resources. Technical Summary FAO. Rome, Italy. 650 p.
- Pimentel, D., C. Harvey, P. Resosardmo, K. Sinclair, D. Kurz, M. McNair, S. Crist, L. Shpritz, L. Fitton, R. Saffouri and R. Blair. 1995. Environmental and economic costs of soil erosion and conservation benefits. *Science* 267(5201): 1117-1123. <https://doi.org/10.1126/science.267.5201.1117>.
- Plancarte, A. 2019. Reforestación con especies nativas en la mixteca oaxaqueña. Fundación Merced, México. 80 p. [En línea]. [Fecha de consulta: 15 de febrero de 2021]. Disponible en: <http://proyectomixtecasustentableac.org/wp-content/uploads/2019/05/Ref-con-Esp-Nat-en-Mixt-Oax-2.pdf>.
- Prävãlie, R. 2021. Exploring the multiple land degradation pathways across the planet. *Earth-Science Reviews* 103689. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2021.103689>.

- Ramírez-López, A., H. Navarro-Garza, A. Pérez-Olvera y V.M. Cetina-Alcalá. 2011. Experiencia organizativa para la reforestación con *Pinus oaxacana* Mirov. En suelos degradados de la Mixteca oaxaqueña. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 2(7): 57-70. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v2i7.560>.
- Registro Nacional Agrario (RAN). 2017. Datos geográficos perimetrales de los núcleos agrarios certificados. Registro Nacional Agrario-Catastro Rural, México. [En línea]. [Fecha de consulta: 10 de diciembre de 2020]. Disponible en: <https://datos.gob.mx/busca/dataset/datos-geograficos-perimetrales-de-los-nucleos-agrarios-certificados-por-estado>.
- Reynolds, J.F., F.T. Maestre, P.R. Kemp, D.M. Stafford-Smith and E. Lambin. 2007. Natural and human dimensions of land degradation in drylands: causes and consequences. In *Terrestrial ecosystems in a changing world*. Springer, Berlin, Heidelberg. pp. 247-257. https://doi.org/10.1007/978-3-540-32730-1_20.
- Rivera-Salgado, G. 2005. Equal in dignity and rights: The struggle of indigenous peoples of the Americas in an age of migration. Universiteit Utrecht.
- Rodríguez, V.P. and K.C. Anderson. 2013. Terracing in the Mixteca Alta, Mexico: cycles of resilience of an ancient land-use strategy. *Human Ecology* 41(3): 335-349. <https://doi.org/10.1007/s10745-013-9578-8>.
- Sandoval-García, R., R. González-Cubas y J. Jiménez-Pérez. 2021. Análisis multitemporal para detectar el cambio en la cobertura del suelo en la Mixteca Alta Oaxaqueña. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*. En prensa.
- Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). 2004. Suelos. Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales, México. Disponible en: https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/informe_resumen/pdf/3_info_resumen.pdf.
- Simpson, I.A., A.J. Dugmore, A. Thomson and O. Vésteinsson. 2001. Crossing the thresholds: human ecology and historical patterns of landscape degradation. *Catena* 42(2-4): 175-192. [https://doi.org/10.1016/S0341-8162\(00\)00137-5](https://doi.org/10.1016/S0341-8162(00)00137-5).
- Spores, R and A.K. Balkansky. 2013. *The Mixtecs of Oaxaca: Ancient Times to the Present*. Vol. 267, University of Oklahoma Press, 328 pp.
- Valencia-Manzo, S., M.V. Velasco-García, M. Gómez-Cárdenas, M. Ruiz-Muñoz y M.Á. Capó-Arteaga. 2006. Ensayo de procedencias de *Pinus greggii* Engelm en dos localidades de la Mixteca Alta de Oaxaca, México. *Revista Fitotecnia Mexicana* 29(1): 27. [En línea]. [Fecha de consulta: 20 de diciembre de 2020]. Disponible en: <https://www.revistafitotecniamexicana.org/documentos/29-1/4a.pdf>.
- Velásquez, J.C. 2002. Sustainable improvement of agricultural production systems in the Mixteca Region of Mexico. NRG Paper 02-01. Mexico. [En línea]. [Fecha de consulta: 13 de diciembre de 2020]. Disponible en: <https://repository.cimmyt.org/bitstream/handle/10883/914/448318.pdf?sequence=4&isAllowed=y>.
- Villaseñor, J.L. 2016. Catálogo de las plantas vasculares nativas de México. *Revista Mexicana de Biodiversidad* 87(3): 559-902. <https://doi.org/10.1016/j.rmb.2016.06.017>.
- Zhou, P., O. Luukkanen, T. Tokola and J. Nieminen. 2008. Effect of vegetation cover on soil erosion in a mountainous watershed. *Catena* 75(3): 319-325. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2008.07.010>.