Impacto de la expansión de *Agave tequilana* en la subprovincia Altos de Jalisco, México

Impact the expansion of *Agave tequilana* in the Altos de Jalisco subprovince, Mexico

Rufino Sandoval-García[1], Gyorgy Eduardo Manzanilla-Quijada[2*], Angélica Bautista-Cruz[3], Juvenal Esquivel Cordoba[2]

[1]Tecnológico Nacional de México, Instituto Tecnológico del Valle de Oaxaca, Carretera al ITAO, S/N, Ex hacienda de Nazareno Xoxocotlán, CP. 71233, Santa Cruz Xoxocotlán, Oaxaca, México.
[2]Facultad de Agrobiología "Presidente Juárez" Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Paseo Lázaro Cárdenas número 2290, colonia Emiliano Zapata. CP. 60170. Uruapan, Uruapan, Michoacán, México.
[3]Instituto Politécnico Nacional, Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional Unidad Oaxaca (CIIDIR Oaxaca). Hornos 1003. CP. 71230. Xoxocotlán, Oaxaca.

*Autor de correspondencia: 0724876a@umich.mx

Artículo científico
Recibido: 14 de abril 2025
Aceptado: 09 de julio 2026

RESUMEN. Durante los últimos 30 años, la expansión del cultivo de *Agave tequilana* Weber var. azul para la producción de tequila ha transformado los ecosistemas de la subprovincia Altos de Jalisco. El objetivo fue evaluar la pérdida de ecosistemas forestales y la reducción del potencial de almacenamiento de carbono derivadas de la expansión de plantaciones de *Agave tequilana*. Se realizó un análisis multitemporal mediante la clasificación supervisada de imágenes de alta resolución con Quantum GIS 3.36.0. Se identificó una pérdida de 423 683 ha de vegetación primaria, equivalente al 26.63 % del área de estudio, distribuida en nueve tipos de vegetación. El bosque de pino-encino presentó la mayor reducción (221 860 ha; 52.36 %), seguido de la selva baja caducifolia. La pérdida estimada del potencial anual de almacenamiento fue de 35 476 689 Mg C, lo que evidencia el impacto ambiental de la expansión del cultivo sobre los ecosistemas forestales regionales.
Palabras clave: Agricultura, biodiversidad, almacenamiento de carbono, erosión, producción de tequila.

ABSTRACT. Over the last 30 years, the cultivation of *Agave tequilana* Weber Var. azul cultivation for the production has transformed the ecosystems of the Altos de Jalisco subprovince. The aim was to assess the loss of forest ecosystems and the reduction in carbon sequestration potential resulting from the espansion of *Agave tequilana* productions. A multitemporal analysis was carried out using supervised classification of high-resolution imagery with Quantum GIS 3.36.0. A loss of 423 683 ha of primary vegetation was identified, equivalent to 26.63% of the study area, distributed across nine vegetation types. The pine-oak forest showed the greatest reduction (221,860 ha: 52.36 %), followed by the lowland deciduous forest. The estimated loss in annual carbon sequestration potential was 35 476 689 Mg C, highlighting the environmental impact of agricultural expansion on regional forest ecosystems.
Keywords: Agriculture, biodiversity, carbon storage, erosion, tequila production.

Como citar: Sandoval-García R, Manzanilla-Quijada GE, Bautista-Cruz A, Esquivel Cordoba J (2026) Impacto de la expansión de *Agave tequilana* en la subprovincia Altos de Jalisco, México. Ecosistemas y Recursos Agropecuarios 13(2): e4577. DOI: 10.19136/era.a13n2.4577.

INTRODUCCIÓN

El cambio de uso de suelo constituye una de las principales causas de pérdida de biodiversidad, degradación de los ecosistemas forestales y disminución de la capacidad de almacenamiento de carbono, proceso que contribuye al incremento de las concentraciones de gases de efecto invernadero y el cambio climático global (CONAFOR 2020, FAO 2015). En México, la expansión de sistemas agrícolas intensivos ha transformado extensas superficies de vegetación natural, reduciendo los servicios ecosistémicos relacionados con el almacenamiento de carbono, la regulación hidrológica y la conservación de la biodiversidad.

Entre los cultivos con mayor expansión se encuentra *Agave tequilana* Weber var. azul, originaria de México y materia prima para la elaboración de tequila (Gentry 1982, Zizumbo-Villarreal *et al*. 2013). El crecimiento sostenido de la demanda nacional e internacional, impulsado por la Denominación de Origen Tequila, la certificación de calidad y la apertura de mercados internacionales, ha favorecido el establecimiento de extensas plantaciones comerciales, principalmente en el estado de Jalisco (Corral *et al.* 2002, CRT 2021). Si bien esta actividad representa un importante motor económico, su expansión del monocultivo ha promovido la sustitución de ecosistemas naturales y la simplificación del paisaje, con efectos negativos sobre la estructura y funcionamiento de los agroecosistemas (Suárez 2014, Tena *et al*. 2018).

Diversas investigaciones han documentado que la conversión de ecosistemas forestales a plantaciones de *A. tequilana* provoca erosión del suelo, alteraciones en sus propiedades físicas y químicas, disminución de la infiltración y la recarga hídrica, contaminación ambiental y pérdida de biodiversidad (Martínez-Rivera *et al.* 2007, Martínez-Palacios *et al*. 2017, Sandoval-García *et al.* 2021). Asimismo, la deforestación reduce el almacenamiento de carbono y favorece la liberación de CO_2 previamente retenido en la biomasa y el suelo (Martínez-Jiménez *et al.* 2019).

La subprovincia Altos de Jalisco concentra una de las mayores superficies cultivadas con *A. tequilana* en México y ha experimentado una rápida transformación del uso del suelo durante las últimas décadas. Sin embargo, aún existe información limitada sobre la magnitud de la pérdida de ecosistemas forestales y la reducción del potencial de almacenamiento de carbono asociadas con la expansión de este cultivo a escala regional. Esta información es fundamental para evaluar las implicaciones ambientales del crecimiento de la industria tequilera y apoyar estrategias de planificación territorial y manejo sustentable del paisaje. Con base en lo anterior, se planteó la hipótesis de que la expansión de las plantaciones de *Agave tequilana* ha contribuido a la pérdida de ecosistemas forestales y a la reducción del potencial de almacenamiento de carbono en la subprovincia Altos de Jalisco. En consecuencia, el objetivo de este estudio fue evaluar la pérdida de ecosistemas forestales y estimar la reducción del potencial de almacenamiento de CO_2 ocasionada por el cambio de uso del suelo mediante un análisis multitemporal.

MATERIALES Y MÉTODOS

Esta investigación se desarrolló en la subprovincia Altos de Jalisco, localizado entre los 21°11’33’’ de latitud norte y 102°20’50’’ de longitud oeste. Esta región comprende una serie de zonas

montañosas y una vasta meseta con altitudes uniformes que forma parte del Eje Neovolcánico (Figura 1).

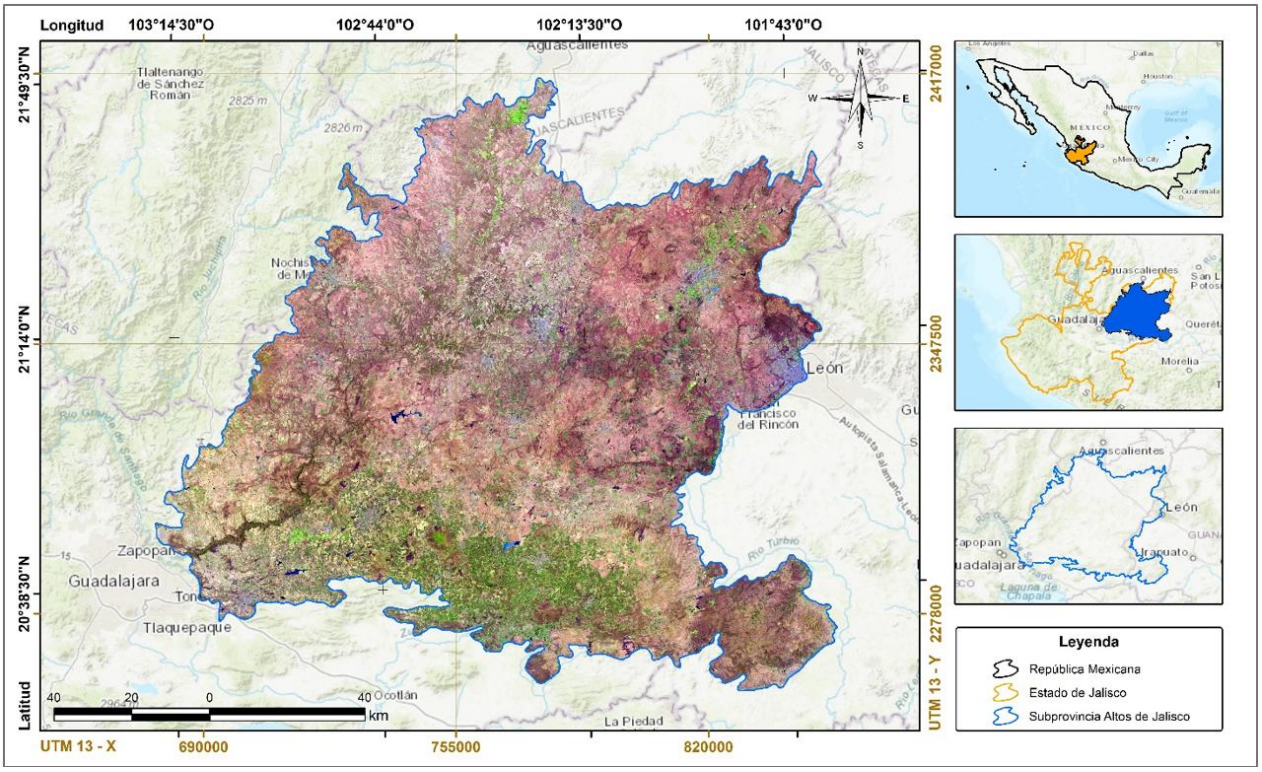


Figura 1. Localización del área de estudio de la subprovincia Altos de Jalisco, México.

La subprovincia Altos de Jalisco está formada por una zona montañosa que alcanzan los 2 000 metros sobre el nivel del mar; la flora y fauna son propicias de clima semidesértico con una vegetación predominante de nopales, mezquites y huizaches, siendo cada vez más árida hacia el norte. Existen lomeríos continuos que oscilan entre los 200 y los 300 metros de altitud (CEM 2024), a pesar de estas condiciones climatológicas y geográficas, existe una importante actividad agrícola, centrada principalmente en el maíz y granos o forrajes para la alimentación del ganado lechero, predominando los cultivos de temporal.

El clima es semicálido y semihúmedo, así como templado y subhúmedo. La temperatura media anual es de 17.3 °C y la precipitación media anual es de 919 mm, siendo julio el mes más lluvioso (INEGI 2021). Los suelos predominantes son los luvisoles, caracterizados por su color marrón o rojizo debido a la presencia de óxidos de hierro y a la acumulación de grandes cantidades de arcilla en su subsuelo (horizonte argílico o Bt); los suelos utilizados para la agricultura tienen rendimientos moderados y son muy susceptibles a la erosión (IIEG 2022).

Clasificación de coberturas

La clasificación de las coberturas se realizó mediante ortofotos, obtenidas de la plataforma Espacios y Datos de México (INEGI 2023) e imágenes satelitales de alta resolución obtenidas de SASPlanet. Ambas herramientas son de libre acceso y código abierto. Con esta información se generaron cuatro

ortomosaicos correspondientes a los años 1993, 2008, 2014 y 2022, compuestos por 52 ortofotos de 1.5 m/píxel (año 1993), 277 imágenes de Airbus Defence and Space 1.14 m/píxel (año 2008), 1,113 imágenes de GeoEye-1 y Birdseye de 0.28 m/pixel (Figura 2).

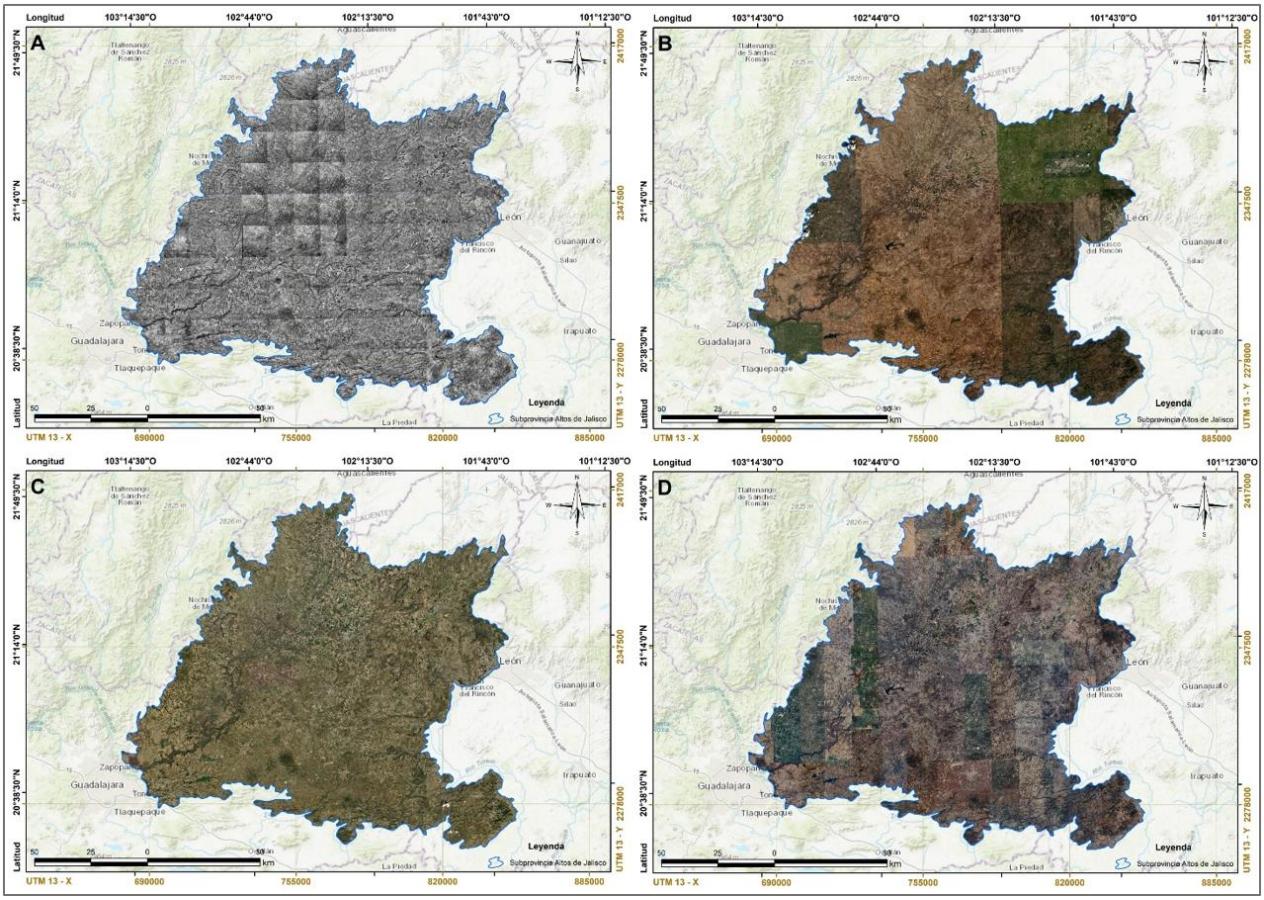


Figura 2. Ortomosaicos del área de estudio para el año 1993 (A), 2008 (B), 2014 (C) y 2022 (D), en la subprovincia Altos de Jalisco, México.

Digitalización de las imágenes

La detección de cambios de coberturas se realizó utilizando el software de código abierto Quantum GIS 3.36.0 "Maidenhead" (QGIS Development Team 2024), utilizando un procedimiento de clasificación supervisada aplicado a cada uno de los ortomosaicos. Posteriormente, se digitalizaron las coberturas identificadas y generó la información relacionada a la superficie ocupada por las actividades de agricultura y las plantaciones de Agave en la subprovincia Altos de Jalisco en cada periodo analizado.

Con la herramienta Intersección de QGIS se integró cada tipo de vegetación de la clasificación de INEGI (2021) con la información editada para cada periodo de agricultura y plantaciones de *A. tequilana*. Finalmente, para estimar la superficie ocupada por dichas actividades en cada uno de los ecosistemas presentes en las subcuencas, se utilizó la herramienta Calculadora de campos (Figura 3).

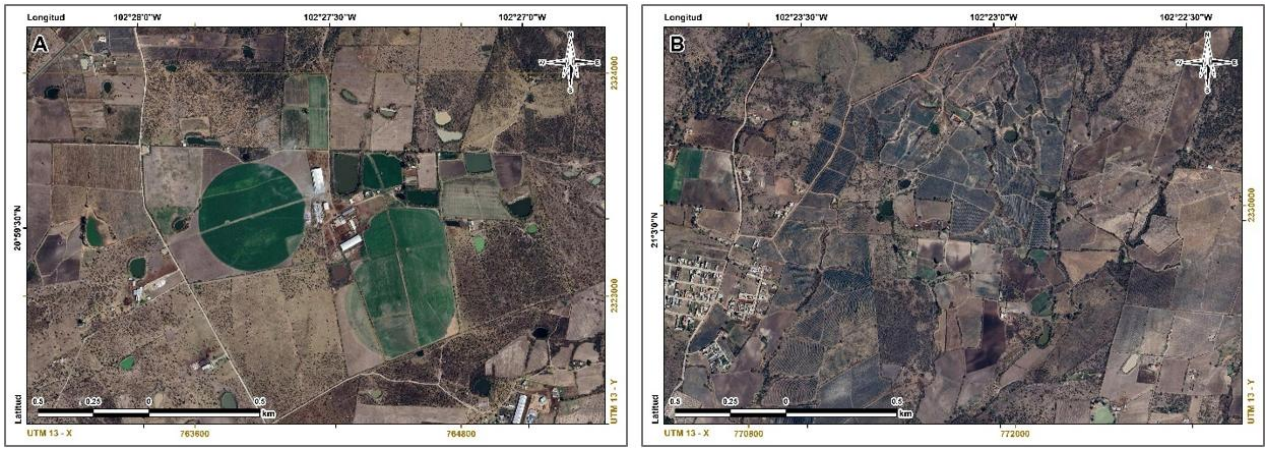


Figura 3. Ejemplo demostrativo de la agricultura (A) y plantaciones de *Agave tequilana* (B) en la subprovincia Altos de Jalisco a partir de imágenes satelitales de 0.28 m/píxel de resolución.

Validación de la información

La concordancia y precisión de la clasificación de las imágenes satelitales de alta resolución se determinó utilizando el módulo r.kappa incorporado en el software GRASS 7.6.0 (QGIS Development Team 2024). Mediante esta herramienta se generó una matriz de error y se determinó el índice de Kappa, mediante la siguiente ecuación (Quezada *et al*. 2022):

$$K = \frac{Po - Pe}{1 - Pe}$$

Donde: Po = Concordancia observada, Pe = Concordancia esperada por azar, y 1 – Pe = Máxima concordancia potencial no correspondida a la casualidad.

El valor medio del índice Kappa fue de 0.80, según Landis y Koch (1977), indica que la coincidencia entre las imágenes es casi perfecta, garantizando un alto grado de similitud a la hora de replicar el estudio. La información fue validada con los antecedentes de uso del suelo y visitas de campo en las que se obtuvieron 60 puntos de control.

Análisis multitemporal

La evaluación de las variaciones en la cobertura forestal (aumento o pérdida) y el uso de suelo se estimó mediante una tabulación cruzada entre cuatro períodos diferentes: 1993-2008, 2008-2014, 2014-2022 y 1993-2022. La estimación se efectuó utilizando la ecuación desarrollada por la FAO (1996) y adaptada por Palacio-Prieto *et al*. (2004).

$$\delta_n = \left[\left(\frac{S_2}{S_1}\right)^{1/n} - 1\right] x\ 100$$

Donde: δ_n = Tasa de cambio expresada en porcentaje, s_1 = Superficie de la fecha 1, s_2 = Superficie de la fecha 2, n = Número de años entre las dos fechas.

Estimación de pérdida del almacenamiento de carbono

Los ecosistemas forestales desempeñan un papel fundamental como sumideros de carbono al capturar dióxido de carbono (CO_2) atmosférico mediante la fotosíntesis, proceso que representa un

flujo anual de carbono. Posteriormente el carbono fijado se incorpora a compuestos orgánicos y se acumula en forma de biomasa, constituyendo un stock o reserva acumulada distribuida en los troncos, el sistema radicular y el follaje de los árboles.

Los bosque de encino almacena en promedio 70 Mg C ha^{-1}; el bosque de encino-pino 128 Mg C ha^{-1}, bosque de mezquite 46 Mg C ha^{-1}, el bosque de pino 62 Mg C ha^{-1}, el bosque de pino-encino 82 Mg C ha^{-1}; el bosque de táscate 58 Mg C ha^{-1}, el matorral crassicaule 24 Mg C ha^{-1}; el pastizal 30 Mg C ha^{-1}; y la selva baja caducifolia 164 Mg C ha^{-1} (Pimienta de la Torre *et al*. 2007, Rodríguez-Laguna *et al*. 2009, Aguirre-Calderón y Jiménez-Pérez 2011, Montaño *et al*. 2016, Rodríguez-Larramendi *et al*. 2016, Casiano-Domínguez *et al*. 2018).

Con base en la información recopilada sobre la capacidad de almacenamiento de carbono de los distintos ecosistemas forestales y los cambios de cobertura registrados en el área de estudio, es posible estimar el efecto que la deforestación y las modificaciones en el cambio de uso del suelo tienen sobre la reserva de carbono. Esto permite cuantificar la disminución del carbono almacenado y en consecuencia, evaluar la reducción de los servicios ecosistémicos relacionados con el almacenamiento de carbono.

RESULTADOS

En la subprovincia Altos de Jalisco se identificaron nueve tipos de vegetación, cuya distribución espacial presentó cambios entre 1993 y 2022 (Figura 4). El bosque de pino-encino constituyó el tipo de vegetación con mayor superficie durante todo el periodo de estudio, representando el 52.36% de la subprovincia que sufrió una reducción de 221 860 ha. Los mayores decrementos netos de superficie se registraron en el pastizal, que disminuyó de 110 476.60 a 70 299.27 ha (-40 177.33 ha), y en la selva baja caducifolia que pasó de 79 620.53 a 65 510.31 ha (-14 110.22 ha) (Tabla 1).

La vegetación secundaria se redujo de forma significativa durante el periodo 2014-2022, especialmente en los bosques de mezquite y de pino, con tasas del -7.51 y el 7.35%, respectivamente, mientras que los pastizales y selva baja caducifolia registraron aumentos del 2.24 y el 1.22% (Tabla 2). Por tanto, estas tasas representan procesos de transición entre coberturas y no cambios netos en la superficie total de cada tipo de vegetación.

Las plantaciones de *A. tequilana* muestran un incremento gradual en los nueve tipos de vegetación presentes en la subprovincia Altos de Jalisco, siendo el periodo 2008-2014 el que registra las mayores tasas de cambio. Los incrementos más elevados se observan principalmente en los bosques de mezquite (BM = 7.27%), matorral crassicaule (MC = 3.10%) y selva baja caducifolia (SBC = 2.92%) respectivamente (Figura 5A), mientras que la agricultura muestra una tendencia opuesta, con una disminución máxima de -7.59% en la selva baja caducifolia (SBC) y -7.29% en el bosque de encino-pino (BEP), que han sido sustituidos por plantaciones de agave para la producción de tequila (Figura 5B).

La conversión de la cobertura forestal hacia otros usos del suelo ocasionó una disminución potencial de carbono almacenado de 35 476 689 Mg C, principalmente en el bosque de pino-encino, quien deja de almacenar 18 192 537 Mg C (correspondiente al 51.28%), mientras que la selva baja

caducifolia la afectación es de 10 743 690 Mg C (correspondiendo al 30.28%), como consecuencia del establecimiento de las plantaciones de *A. tequilana* (Tabla 3).

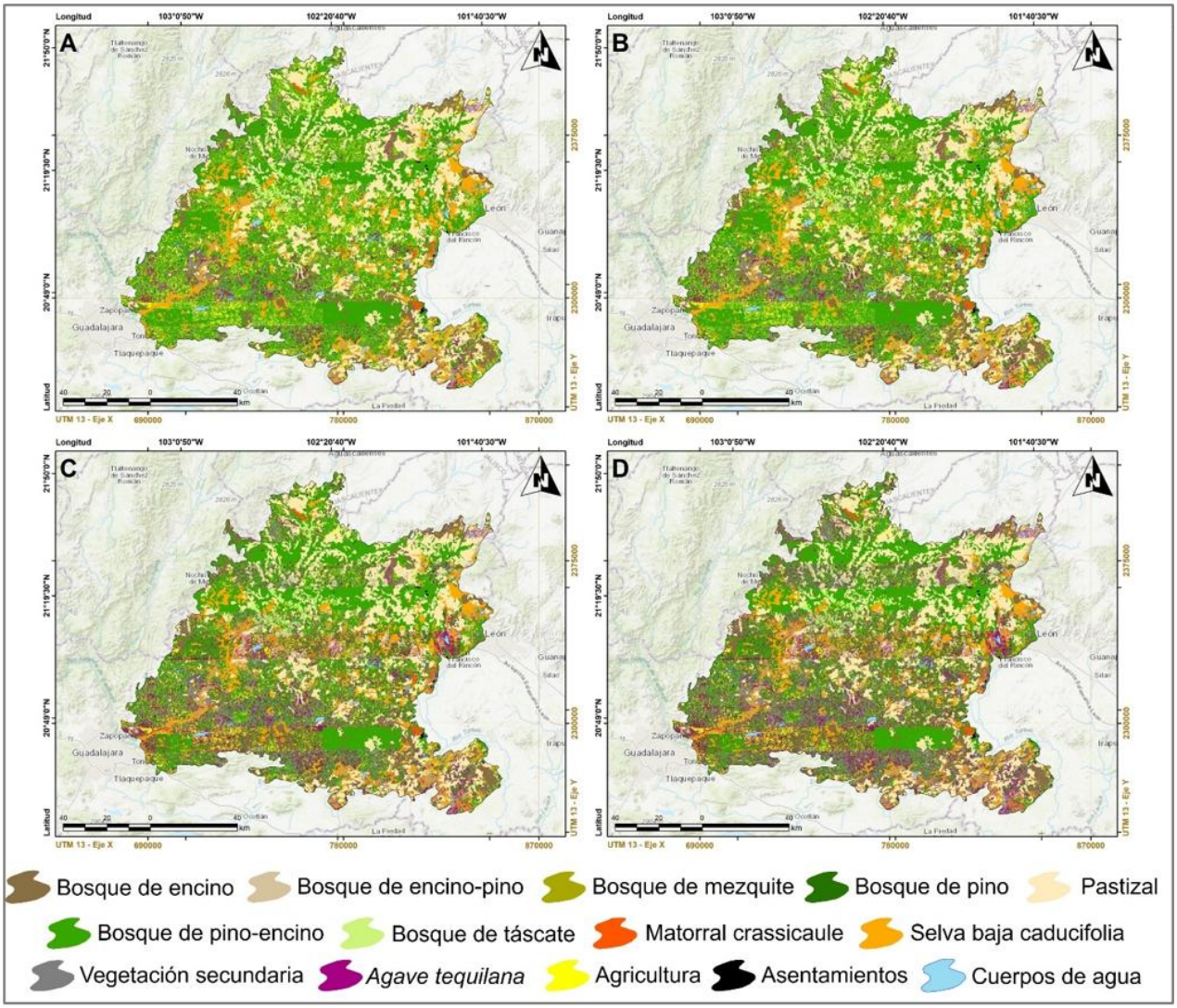


Figura 4. Uso de suelo y vegetación en la subprovincia Altos de Jalisco, para los años 1993 (A), 2008 (B), 2014 (C) y 2022 (D).

DISCUSIÓN

Los resultados del análisis multitemporal evidencian que la subprovincia Los Altos de Jalisco ha experimentado importantes cambios en la cobertura y uso del suelo entre 1993 y 2022, asociados principalmente con la expansión de las plantaciones de *Agave tequilana*. La comparación de las coberturas muestra una reorganización del paisaje, caracterizada por el incremento de la superficie destinada al cultivo de agave y modificaciones en la extensión de los diferentes tipos de vegetación. Las mayores tasas de expansión del cultivo ocurrieron durante el periodo 2008–2014, lo que coincide con la consolidación de la industria tequilera y el incremento sostenido de la demanda

internacional de tequila. Estos resultados concuerdan con lo reportado por García-Mendoza (2002) y Lira *et al*. (2022), quienes documentan que la expansión del cultivo de *A. tequilana* ha sido uno de los principales factores de transformación del paisaje en la región de Los Altos de Jalisco. Dichos autores señalan que el crecimiento de la superficie cultivada responde principalmente a la creciente demanda del mercado internacional y a la elevada rentabilidad del cultivo, promoviendo la sustitución gradual de la vegetación natural y de otros usos del suelo por plantaciones comerciales.

Tabla 1. Superficie y porcentaje de **la** cobertura forestal de la subprovincia Altos de Jalisco, México durante 1993, 2008, 2014 y 2022.

Tipo de vegetación	Año 1993		Año 2008		Año 2014		Año 2022	
	ha	%	ha	%	ha	%	ha	%
BE	42 775.22	9.50	46 842.81	10.07	48 583.12	11.08	52 318.47	12.35
BEP	751.03	0.17	832.39	0.18	897.03	0.20	948.87	0.22
BM	3.31	0.00	3.76	0.00	3.66	0.00	4.30	0.00
BP	18.29	0.00	24.34	0.01	29.68	0.01	41.71	0.01
BPE	203 985.55	45.33	218 886.50	47.07	208 965.85	47.67	221 860.21	52.36
BT	9 769.87	2.17	9 838.85	2.12	10 306.54	2.35	10 004.51	2.36
MC	2 636.85	0.59	2 773.90	0.60	2 698.37	0.62	2 695.41	0.64
P	110 476.60	24.55	105 120.22	22.60	92 569.68	21.12	70 299.27	16.59
SBC	79 620.53	17.69	80 744.83	17.36	74 349.80	16.96	65 510.31	15.46
Total	450 037.24	100	465 067.61	100	438 403.73	100	423 683.05	100

BE: bosque de encino, BEP: bosque de encino-pino, BM: bosque de mezquite, BP: bosque de pino, BPE: bosque de pino-encino, BT: bosque de táscate, MC: matorral crassicaule, P: pastizal y SBC: selva baja caducifolia.

Tabla 2. Tasa de conversión (%) de la cobertura forestal subprovincia Altos de Jalisco, México, durante 1993, 2008, 2014 y 2022.

Tipo de vegetación	1993-2008			2008-2014			2014-2022			1993-2022		
	VS	PA	A	VS	PA	A	VS	PA	A	VS	PA	A
BE	-0.81	0.77	-1.56	-1.11	1.37	-3.01	-1.28	0.64	-4.15	-1.00	0.86	-2.58
BEP	-0.62	0.55	-1.97	-1.49	2.03	-7.29	-1.73	1.63	-5.70	-1.10	1.15	-4.12
BM	-2.14	2.94	-0.69	-4.50	7.27	-0.71	-7.51	5.06	-4.21	-4.14	4.40	-1.68
BP	-1.37	2.20	-1.64	-3.05	2.61	-5.62	-7.35	0.79	-5.40	-3.40	1.89	-3.52
BPE	-0.24	0.29	-0.57	-0.25	1.13	-0.52	-0.56	0.45	-0.85	-0.33	0.51	-0.64
BT	-0.20	1.26	-1.36	-1.06	2.00	-5.38	-0.55	2.16	-1.22	-0.48	1.66	-2.17
MC	-0.72	1.01	-0.91	-0.36	3.10	-5.22	-0.52	1.37	-3.52	-0.59	1.54	-2.54
P	0.41	0.38	-0.74	1.81	1.06	-1.35	2.24	0.76	-1.01	1.20	0.62	-0.94
SBC	0.13	0.20	-1.39	1.68	2.92	-7.59	1.22	1.73	-4.65	0.75	1.18	-3.61

BE: bosque de encino, BEP: bosque de encino-pino, BM: bosque de mezquite, BP: bosque de pino, BPE: bosque de pino-encino, BT: bosque de táscate, MC: matorral crassicaule, P: pastizal, SBC: selva baja caducifolia, VS: Vegetación secundaria, PA: Plantaciones de *Agave tequilana* y A: Agricultura.

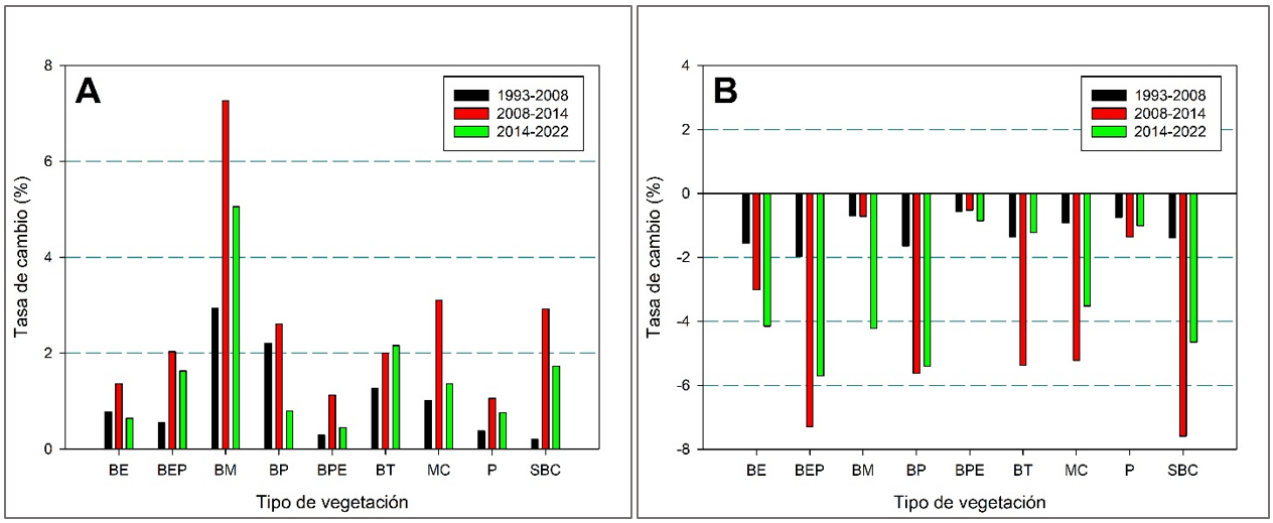


Figura 5. Tasa de cambio de las plantaciones de *Agave tequilana* (A) y agricultura (B) en la subprovincia Altos de Jalisco. BE: bosque de encino, BEP: bosque de encino-pino, BM: bosque de mezquite, BP: bosque de pino, BPE: bosque de pino-encino, BT: bosque de táscate, MC: matorral crassicaule, P: pastizal y SBC: selva baja caducifolia.

Tabla 3. Almacenamiento de Carbono de la cobertura forestal en la subprovincia Altos de Jalisco, México.

Tipo de vegetación	Superficie (ha)	Mg C	%
Bosque de encino	52 318.47	3 662 292.76	10.32
Bosque de encino-pino	948.87	121 455.24	0.34
Bosque de mezquite	4.30	197.74	0.00
Bosque de pino	41.71	2 586.30	0.01
Bosque de pino-encino	221 860.21	18 192 536.96	51.28
Bosque de táscate	10 004.51	580 261.48	1.64
Matorral crassicaule	2 695.41	64 689.85	0.18
Pastizal	70 299.27	2 108 977.95	5.94
Selva baja caducifolia	65 510.31	10 743 690.31	30.28
Total	423 683.05	35 476 688.59	100

Las tasas de cambio obtenidas muestran que la dinámica de transformación no fue uniforme entre periodos ni entre tipos de vegetación. El intervalo 2008–2014 registró las mayores tasas de expansión del cultivo de agave sobre áreas previamente ocupadas por bosque de mezquite, matorral crassicaule y selva baja caducifolia. En contraste, la agricultura presentó una tendencia decreciente durante el mismo periodo, lo que refleja la intensa reorganización territorial asociada con la especialización productiva de la región. Estos resultados evidencian que la expansión del agave constituye uno de los principales procesos recientes de cambio de uso del suelo en la subprovincia Altos de Jalisco. Diversos estudios han documentado que la conversión de ecosistemas naturales hacia monocultivos intensivos modifica la estructura y funcionamiento de los ecosistemas. Martínez-Jiménez *et al*. (2019) indican que el establecimiento continuo de plantaciones de agave altera las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo, reduce la heterogeneidad del paisaje y favorece procesos de degradación ambiental. Asimismo, la simplificación estructural derivada del monocultivo disminuye la disponibilidad de hábitats para

numerosas especies y afecta procesos ecológicos como la polinización y la conservación de la biodiversidad.

Entre los ecosistemas presentes en la región, la selva baja caducifolia representa uno de los más vulnerables frente al cambio de uso del suelo. Trejo y Dirzo (2000) documentaron que este ecosistema ha experimentado una importante reducción de su cobertura a nivel nacional como consecuencia de la expansión agrícola y pecuaria. Posteriormente, Meave *et al*. (2012) señalaron que la transformación continua de la selva baja caducifolia constituye una de las principales amenazas para su conservación debido a la pérdida de biodiversidad y al incremento de la fragmentación del paisaje. Los patrones observados en este estudio son consistentes con dichos antecedentes, ya que la expansión de las plantaciones de *Agave tequilana* continúa ejerciendo presión sobre este ecosistema.

La transformación del paisaje observada en Los Altos de Jalisco forma parte de un proceso regional documentado en otras zonas productoras de agave en México. Guevara-Gutiérrez *et al*. (2024) reportan que la creciente demanda de tequila ha favorecido la expansión del cultivo de agave azul fuera de su distribución histórica, incrementando la presión sobre los ecosistemas naturales. De manera similar, Sandoval-García *et al*. (2024) documentaron que la expansión de plantaciones destinadas a la producción de mezcal en Oaxaca provocó la sustitución de ecosistemas nativos y una importante reducción del carbono almacenado en la vegetación. Estos antecedentes respaldan la hipótesis de que la expansión de cultivos comerciales de agave constituye un factor relevante de transformación ambiental en diferentes regiones del país.

En cuanto al carbono, los resultados muestran que la mayor proporción del carbono almacenado se concentra en los bosques de pino-encino y en la selva baja caducifolia, lo que pone de manifiesto la importancia de estos ecosistemas como reservorios de carbono. En consecuencia, la sustitución de estas coberturas por sistemas agrícolas representa una disminución del carbono almacenado en el paisaje y reduce la capacidad de los ecosistemas para mantener este servicio ambiental.

En conjunto, los resultados confirman que la expansión de las plantaciones de *Agave tequilana* constituye uno de los principales motores del cambio de uso del suelo en la subprovincia Altos de Jalisco. La continuidad de este proceso podría incrementar la fragmentación de los ecosistemas, reducir el carbono almacenado y comprometer otros servicios ecosistémicos fundamentales. Estos hallazgos proporcionan información útil para orientar estrategias de ordenamiento territorial y manejo sostenible que permitan compatibilizar el desarrollo de la agroindustria tequilera con la conservación de los ecosistemas naturales.

CONCLUSIONES

El análisis multitemporal permitió identificar que la subprovincia Altos de Jalisco experimentó importantes cambios en la cobertura y uso del suelo entre 1993 y 2022, caracterizados por la expansión de las plantaciones de *Agave tequilana* y la modificación de la distribución espacial de los distintos tipos de vegetación. El periodo 2008-2014 registró las mayores tasas de expansión del cultivo, lo que refleja la intensificación de la actividad agroindustrial en la región. Los cambios de

uso del suelo asociados con el establecimiento de plantaciones de *A. tequilana* modifican la estructura del paisaje y ejercen presión sobre los ecosistemas naturales, particularmente sobre aquellos que almacenan mayores cantidades de carbono. Los resultados sugieren que la expansión del cultivo de *Agave tequilana* incrementa la presión sobre los ecosistemas naturales y resalta la necesidad de implementar estrategias de manejo sostenible. Asimismo, el estudio constituye una base para futuras investigaciones orientadas a cuantificar las emisiones derivadas del cambio de uso del suelo y evaluar las tasas anuales de almacenamiento de carbono mediante metodologías específicas para ese propósito.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) por el otorgamiento de la beca de posdoctorado al autor de correspondencia (CVU 469568). Asimismo, expresan su agradecimiento al Instituto Tecnológico del Valle de Oaxaca, la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo y al Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional Unidad Oaxaca, por el apoyo brindado para la para el desarrollo de la presente investigación.

CONFLICTO DE INTERÉS

Los autores declaran que no tienen intereses en competencia.

LITERATURA CITADA

Aguirre-Calderón OA, Jiménez-Pérez J (2011) Evaluación del contenido de carbono en bosques del sur de Nuevo León. Revista Mexicana de Ciencias Forestales 2(6): 73-83. https://doi.org/10.29298/rmcf.v2i6.575

Casiano-Domínguez M, Paz-Pellat F, Rojo-Martínez M, Covaleda-Ocon S, Aryal DR (2018) El carbono de la biomasa aérea medido en consecuencias: primera estimación en México. Madera y Bosques 24 (núm. sp.): e2401894. https://doi.org/10.21829/myb.2018.2401894

CEM (2024) Continuo de elevaciones mexicano y modelos digitales de elevación. Continuo de Elevaciones Mexicano https://www.inegi.org.mx/app/geo2/elevacionesmex/. Fecha de consulta: 15 de septiembre de 2024.

CONAFOR (2020) Estimación de la tasa de deforestación en México para el periodo 2001-2018 mediante el método de muestreo. Comisión Nacional Forestal Documento Técnico. Jalisco, México. https://www.gob.mx/conafor/documentos/estimacion-de-la-tasa-dedeforestacion-bruta-en-mexico-para-el-periodo-2001-2018-mediante-el-metodo-demuestreo?idiom=es. Fecha de consulta: 10 de agosto de 2024.

Corral JAR, Barrios EP, Hernández JZ (2002) Regiones térmicas óptimas y marginales para el cultivo de *Agave tequilana* en el estado de Jalisco. Agrociencia 36(1): 41-53.

CRT (2021) Estadísticas 2020. Consejo Regulador del Tequila https://www.crt.org.mx/ EstadisticasCRTweb/. Fecha de consulta: 10 de septiembre de 2024.

FAO (1996) Forest resources assessment 1990: Survey of tropical forest cover and study of change processes-Tropical countries. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Roma, Italia. 152p.

FAO (2015) FAO assessment of forests and carbon stocks, 1990–2015. Reduced overall emissions, but increased degradation. Rome FAO. Recuperado: http://www.fao.org/3/a-i4470e.pdf. Fecha de consulta: 15 de agosto de 2024

García-Mendoza A (2002) Distribution of the genus *Agave* (Agavaceae) and its endemic species in Mexico. Cactus and Succulent Journal 74(4): 177-187.

Gentry SH (1982) Agaves of Continental North America. University of Arizona Press. Tucson. 670p.

Guevara-Gutierrez RD, Palomera-Garcia C, Olguin-Lopez JL, Mancilla-Villa OR, Rosales-Almendra MP, Barreto-Garcia OA (2024) Effect of Blue Agave (*Agave tequilana* Weber) management on soil erosion. Air, Soil and Water Research, 17: 11786221241236632. https://doi.org/10.1177/11786221241236632

IIEG (2022) Geología, edafología y uso de suelo y vegetación. Jalisco, Arandas, Jalisco, Los altos de Jalisco. Instituto de Información Estadística y Geográfica de Jalisco. México. https://iieg.gob.mx/ns/wp-content/uploads/2022/10/Arandas.pdf. Fecha de consulta: 10 de agosto de 2024

INEGI (2021) Conjunto de datos vectoriales de uso del suelo y vegetación. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Escala 1:250, 000. Serie VII (Conjunto Nacional). http://www.inegi.org.mx. Fecha de consulta: 15 de agosto de 2024

INEGI (2023) Ortoimágenes. Escala 1:20,000. Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) https://www.inegi.org.mx/temas/imagenes/ortoimagenes/#Descargas. Fecha de consulta: 10 de julio de 2024.

Landis JR, Koch GGG (1977) The measurement of observer agreement for categorical data. Biometrics 33: 159-174. https://doi.org/10.2307/2529310

Lira MG, Davidson-Hunt IJ, Robson JP (2022) Artisanal products and land-use land-cover change in indigenous communities: The case of mezcal production in Oaxaca, Mexico. Land 11(3): 387. https://doi.org/10.3390/land11030387

Martínez-Jiménez R, Ruiz-Vega J, Caballero-Caballero M, Silva-Rivera ME, Montes-Bernabé JL (2019) *Agave*s silvestres y cultivados empleados en la elaboración de mezcal en Sola de Vega, Oaxaca. México. Tropical and Subtropical Agroecosystems 22: 477-485.

Martínez-Palacios A, Chávez-Mendoza SA, Reyes-González R, Lobit P, Sánchez-Vargas N, Prat C (2017) Manejo forestal para el cultivo de *Agave cupreata*. *In* Gabino Alberto Martínez Gutiérrez GB (ed.), Cortés Martínez CI (ed.), Lucía Armin Langlé Argüello LA (ed.). Primer Congreso Nacional de *Agave*-Mezcal: memoria de resúmenes, Oaxaca: CIIDIR, 2017, p. 8. Congreso Nacional de *Agave*-Mezcal, 1., 2017/09/28-29, Oaxaca.

Martínez-Rivera LM, Gerritsen P, Rosales JJ, Moreno A, Contreras S, Solís A, Rivera LE, Cárdenas OG, Iñiguez LI, Cuevas R, Palomera C, Garcia E, Aguirre A, Olguín JL (2007) Implicaciones socio-ambientales de la expansión del cultivo de agave azul (1995-2002) en el municipio de Tonaya, Jalisco, México. En lo ancestral hay futuro: Del tequila, los mezcales y otros agaves, eds. P. Colunga-GarcíaMarín, L. Eguiarte, A. Largué S, and D. Zizumbo-Villarreal, 265-284.

Meave JA, Romero-Romero MA, Salas-Morales SH, Pérez-García EA, Gallardo-Cruz JA (2012) Diversidad, amenazas y oportunidades para la conservación del bosque tropical caducifolio en el estado de Oaxaca, México. Ecosistemas 21(1-2): 85-100.

Montaño NM, Ayala F, Bullock SH, Briones O, García OF, García SR, Maya Y, Perroni Y, Siebe C, Tapia TY, Troyo E, Yépez E (2016) Almacenes y flujos de carbono en ecosistemas áridos y semiáridos de México: Síntesis y perspectivas. Terra Latinoamericana. 34: 39-59. https://www.terralatinoamericana.org.mx/index.php/terra/article/view/75/81 Fecha de consulta: 10 febrero de 2024

Palacio-Prieto JL, Sánchez-Salazar TM, Casado-Izquierdo JM, PropinFrejomil E, Delgado-Campos J, Velázquez-Montes A, Chias-Becerril L, Ortiz-Álvarez MI, González-Sánchez J, Negrete-Fernández G, Gabriel-Morales J, Márquez-Huitzil R (2004) Indicadores para la caracterización y ordenamiento del territorio. Instituto Nacional de Ecología-SEMARNAT, Instituto de Geografía de la UNAM y Secretaría de Desarrollo Social. Convenio SEDESOL-Instituto de Geografía, UNAM. México. 161 p.

Pimienta de la Torre DDJ, Domínguez Cabrera G, Aguirre Calderón Ó, Javier Hernández F, Jiménez Pérez J (2007) Estimación de biomasa y contenido de carbono de *Pinus cooperi* Blanco, en Pueblo Nuevo, Durango. *Madera y bosques*, *13*(1): 35-46. https://doi.org/10.21829/myb.2007.1311234

QGIS Development Team (2024). QGIS Geographic Information System. Open-Source Geospatial Foundation Project. https://qgis.org. Fecha de consulta: 20 de agosto de 2024

Quezada AS, Sevilla-Tapia JD, Avilés-Sacoto EC (2022) Estimación de la tasa de deforestación en Pastaza y Orellana- Ecuador mediante el análisis multitemporal de imágenes satelitales durante el período 2000-2020. Revista de Investigación en Ciencias Agronómicas y Veterinarias 6: 282-299. https://doi.org/10.33996/revistaalfa.v6i17.168

Rodríguez-Laguna R, Jiménez-Pérez J, Aguirre-Calderón OA, Treviño-Garza EJ, Razo-Zárate R (2009) Estimación de carbono almacenado en el bosque de pino-encino en la Reserva de la Biosfera El Cielo, Tamaulipas, México. Ra Ximhai. 5 (3): 317-327. ISSN: 1665-0441. http://www.revistas.unam.mx/index.php/rxm/article/view/15164. Fecha de consulta: 10 de septiembre de 2024.

Rodríguez-Larramendi LA, Guevara-Hernández F, Reyes-Muro L, Ovando-Cruz J, Nahed-Toral J, Prado-López M, Campos Saldaña RA (2016) Estimación de biomasa y carbono almacenado en bosques comunitarios de la región Frailesca de Chiapas, México. Revista Mexicana de Ciencias Forestales, 7(37), 77-94. versión impresa ISSN 2007-1132

Sandoval-García C, Cantú-Silva I, González-RodríguezH, Yánez-Díaz MI, Marmolejo-Monsiváis GJ, Gómez Meza MV (2021) Efecto de diferentes usos del suelo en las propiedades físicas e hidrológicas de un Luvisol en Oaxaca. Revista Mexicana de Ciencias Forestales 12(68): 151-177. https://doi.org/10.29298/rmcf.v12i68.982

Sandoval-García R, Sandoval-García C, García CS, Morales PM (2024) Pérdida de ecosistemas forestales en dos subcuencas del estado de Oaxaca, México, por el incremento de plantaciones de Agave. Acta Botánica Mexicana (131): 47. https://doi.org/10.21829/abm131.2024.2261

Suárez A (2014) Percepciones y discursos culturales en torno al paisaje agavero. Universidad de Guadalajara, México. 162p.

Tena M, Ávila R, Navarro CR (2018) Tequila, heritage and tourism: is the Agave landscape sustainable? En: Medina XT (ed) Food, gastronomy and tourism. Social and cultural perspectives. Colección estudios del hombre. pp. 49-67.

Trejo I, Dirzo R (2000) Deforestation of seasonally dry tropical forest: A national and local analysis in Mexico. Biological conservation 94(2): 133-142. https://doi.org/10.1016/S0006-3207(99)00188-3

Zizumbo-Villarreal D, Vargas-Ponce O, Rosales-Adame JJ, Colunga-García MP (2013) Sustainability of the traditional management of Agave genetic resources in the elaboration of mezcal and tequila spirits in western Mexico. Genetic Resources and Crop Evolution 60: 33-47.