





Análisis multitemporal del cambio de uso de suelo en el municipio de Linares, Nuevo León

Multi-temporal analysis of land use change in the municipality of Linares, Nuevo León

María Cecilia Hernández-Cavazos¹ ,
Rufino Sandoval-García^{2*} ,
Víctor M. Molina-Guerra¹ ,
Eduardo Alanís-Rodríguez³ 

¹Departamento de Investigación y Gestión. RENAC, S.A. de C.V. Perlitas 127, Col. Las Glorias, CP. 67710. Linares, Nuevo León, México.

²Departamento Forestal. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Calza Antonio Narro 1923, Buenavista, CP. 25315. Saltillo, Coahuila, México.

³Universidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de Ciencias Forestales, Carretera Linares-Cd. Victoria km 145, Apartado Postal 41, CP. 67700. Linares, Nuevo León, México.

*Autor de correspondencia: rufino.sandoval.garcia@gmail.com

Artículo científico

Recibido: 18 de abril 2023

Aceptado: 23 de junio 2023

Como citar: Hernández-Cavazos MC, Sandoval-García R, Molina-Guerra VM, Alanís-Rodríguez E (2023) Análisis multitemporal del cambio de uso de suelo en el municipio de Linares, Nuevo León. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios* 10(2): e3743. DOI: 10.19136/era.a10n2.3743

RESUMEN. La presente investigación tuvo como objetivo realizar un análisis multitemporal de cambio de uso de suelo y cobertura vegetal en el municipio de Linares, Nuevo León México, en cinco períodos de tiempo diferentes: 1995-2008, 2008-2014, 2014-2021 y 1995-2021. Para el análisis, se realizó una clasificación supervisada de ortofotos e imágenes satelitales de alta resolución GeoEye-1 y Birdseye. La precisión de la clasificación de imágenes presentó valores promedio de índice de Kappa de 0.76, considerados dentro de un nivel de precisión sustancial. Con los datos obtenidos se calculó la tasa de deforestación anual mediante la ecuación propuesta por Puyravaud. Los resultados indican que en un lapso de 26 años el municipio perdió el 61.77% de sus bosques de encino-pino, pino-encino y encino, mostrando tasas de deforestación anual de -5.82%, -3.31% y -3.06%, respectivamente; así mismo, se perdió el 27.58% de matorral submontano y el 4.8% de matorral desértico rosetófilo, con tasas de deforestación anual de -1.24 y -0.19%, respectivamente. A diferencia de la selva baja espinosa caducifolia y el pastizal, que mostraron un incremento de cobertura vegetal de 310.58 y 18.09%, con tasas de cambio anual de 5.43 y 0.64%, respectivamente. Estos cambios de cobertura y uso de suelo pueden llegar a afectar procesos atmosféricos y climáticos globales, por lo que este estudio pretende servir de referencia para el diseño de políticas públicas y programas de conservación y manejo sostenible de los recursos naturales.

Palabras clave: Cobertura vegetal, imágenes satelitales, clasificación supervisada, tasa de deforestación, actividades antrópicas.

ABSTRACT. The aim of this research was to perform a multi-temporal analysis of land use change and vegetation cover in Linares, Nuevo León, México, at five different time periods: 1995-2008, 2008-2014, 2014-2021 and 1995-2021. For the analysis, a supervised classification of orthophotos and high-resolution satellite images GeoEye-1 and Birdseye was performed. The accuracy of the image classification presented average values of Kappa index of 0.76, considered within a substantial level of accuracy. With the data obtained, the annual deforestation rate was calculated using the equation proposed by Puyravaud. The results indicate that in a period of 26 years the municipality lost 61.77% of its oak-pine, pine-oak and oak forests, showing annual deforestation rates of -5.82%, -3.31% and -3.06% respectively; Likewise, 27.58% of submontane scrubland and 4.8% of rosetophilous desert scrubland were lost, with annual deforestation rates of -1.24 and -0.19%, respectively. Unlike the low deciduous spiny forest and the grassland, which showed an increase in plant cover of 310.58 and 18.09%, with annual exchange rates of 5.43 and 0.64%, respectively. These changes in land cover and use can affect global atmospheric and climate processes, so this study aims to serve as a reference for the design of public policies and programs for conservation and sustainable management of natural resources.

Key words: Vegetation cover, satellite images, supervised classification, deforestation rate, human activities.

INTRODUCCIÓN

Una de las herramientas más importantes en sistemas de información geográfica (SIG) y percepción remota es la detección de cambios en el uso de suelo a partir de una secuencia multitemporal de imágenes de satélite (Emanuelli-Avilés *et al.* 2016). Con el uso de estas aplicaciones se han logrado medir y evaluar los cambios en las condiciones del suelo, así como los tipos de vegetación y su estado durante un período de tiempo (Sanhouse-García *et al.* 2016, Sandoval-García *et al.* 2021a). Con la información generada se pueden identificar patrones o tendencias que permitan atender problemáticas ambientales como la degradación, desertificación, pérdida de la biodiversidad y deforestación (Velázquez *et al.* 2002).

A nivel mundial el avance progresivo de la agricultura y ganadería, así como los incendios forestales y la tala clandestina, son consideradas las principales causas de pérdida de la cubierta vegetal (FAO y PNUMA 2020). La deforestación es la huella más significativa de la destrucción y degradación de los ecosistemas terrestres en los últimos 50 años (Galicia-Sarmiento *et al.* 2007). Estos procesos son ocasionados por factores demográficos, económicos, tecnológicos, políticos e institucionales y culturales (Galicia-Sarmiento *et al.* 2007, Brovelli *et al.* 2020). De acuerdo con la FAO y PNUMA (2020) desde 1990 se han perdido en todo el mundo 420 millones de hectáreas de bosque a causa del cambio de uso de suelo; mientras que entre 2015 y 2020 la tasa de deforestación fue de 10 millones de hectáreas al año.

En México la deforestación es uno de los problemas más importantes en la política ambiental (Sánchez-Reyes *et al.* 2017). De acuerdo con la CONAFOR (2020), la vegetación original se ha reducido drásticamente, debido principalmente a la conversión de terrenos forestales a usos agropecuarios (94%). Tan sólo en el período de 2001-2018 la tasa de deforestación fue de 212,070 ha al año, siendo la principal causa de deforestación la conversión a pastizales (74%), seguido de la agricultura (20%).

En México se han realizado un número creciente de investigaciones que utilizan sistemas de información geográfica y percepción remota para detectar los cambios de uso de suelo y vegetación y cuantificar la tasa de deforestación anual. Como las investigaciones realizadas por Bocco *et al.* (2001) en el estado de Michoacán, Castelán-Vega *et al.* (2007) en la subcuenca del río San Marcos, Puebla; Leija-Loredo *et al.* (2016) en los municipios de Santa María Colotepec y Santa María Tonameca de la región costera del estado de Oaxaca; Palomeque-De la Cruz *et al.* (2021) en el municipio de Nacajuca, Tabasco; Sandoval-García *et al.* (2021a) en el Parque Nacional Cumbres de Monterrey; y Sandoval-García *et al.* (2021b) en una microcuenca de la Mixteca Alta Oaxaqueña, México; entre otras.

El municipio de Linares es la principal ciudad de la zona citrícola y del sur del estado de Nuevo León (Noreste de México), así como la más importante después de las ciudades que conforman el área metropolitana de Monterrey. Su crecimiento ha sido paulatino y constante, estimando para el año 2020 una población total de 84 666 habitantes, de los cuales 70 378 conforman el centro de población (INEGI 2021). Además de la producción citrícola, el municipio presenta un acelerado crecimiento industrial y una actividad agropecuaria importante (Dávila-Pórcel *et al.* 2013). Estas actividades productivas han influido de manera directa e indirecta en la modificación de los usos del suelo y vegetación. En el municipio se han generado investigaciones para la evaluación de cambio de uso de suelo y vegetación utilizando imágenes satelitales Landsat de 30 m/píxel (García-Hernández y Jurado 2008), las cuales son consideradas de baja resolución. Por tal motivo, el objetivo de la presente investigación fue realizar un análisis multitemporal de la superficie del municipio de Linares, Nuevo León, para determinar los cambios en el uso de suelo y la cubierta vegetal en cinco períodos de tiempo diferentes: 1995-2008, 2008-2014, 2014-2021 y 1995-2021, utilizando imágenes de alta resolución espacial de los satélites GeoEye-1 y Birdseye.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

El municipio de Linares se ubica al suroriente del estado de Nuevo León (Figura 1) y sus coordenadas geográficas del centro del municipio corresponden a 24° 51' 35" de latitud norte y 99° 34' 04' de longitud oeste (INEGI 2017). Tiene una superficie de 2 445.20 km² y el centro de población 22.48 km². Colinda al norte con los municipios de Montemorelos y General Terán; al este con el municipio de General Terán y con el estado de Tamaulipas; al sur con el estado de Tamaulipas; y al oeste con los municipios de Iturbide y Rayones (INEGI 2010).

El área de estudio forma parte de la Región Hidrológica RH25 San Fernando-Soto la Marina conocida también con el nombre de Golfo Norte. Esta región hidrológica se sitúa en el noreste de la República Mexicana, en los estados de Tamaulipas y Nuevo León. Con una superficie total de 56 928 km² (Vázquez-Ochoa *et al.* 2021). Las principales corrientes son los ríos Hualahuises y Pablillo que se unen antes de llegar a la presa José López Portillo (Cerro Prieto). Los climas dominantes en el municipio de Linares son semicálido subhúmedo con lluvias en verano ACw, semiseco muy cálido y cálido BS1(h'), templado subhúmedo con lluvias en verano C(w) y semicálido subhúmedo con lluvias escasas, todo el año ACx. El tipo de suelo dominante es el Vertisol (40.9%), que es un suelo profundo y de color oscuro, seguido del Leptosol (28.5%), Regosol (9.9%), Calcisol (6.2%), Chernozem (4.2%), Kastañozem (3.2%), Cambisol (1.2%), Fluvisol (0.2%), Gypsisol (0.2%) y Luvisol (0.1%). La precipitación pluvial varía de 500 mm a 1 100 mm al año y el rango de temperatura es de 16 a 24 °C. (INEGI 2010).

Adquisición de imágenes

Las ortofotos se obtuvieron de la plataforma Espacios y Datos de México a través de la página web del INEGI (INEGI 2022b) y las imágenes satelitales GeoEye-1 y Birdseye del software SAS-Planet (SASPlanet 2022). Ambas herramientas son de código abierto que permiten realizar la visualización y descarga de las imágenes de manera

gratuita. Se generaron cuatro ortomosaicos compuestos por 30 ortofotos de 2 m/pixel (año 1995), 120 ortofotos de 1 m/pixel (año 2008), 642 imágenes de GeoEye-1 de 0.28 m/pixel (año 2014) y 642 imágenes Birdseye 0.28 m/pixel (año 2021).

Pre-procesamiento de imágenes

Para preparar las imágenes satelitales previo a su procesamiento y utilización en el análisis, se realizó una corrección geométrica a través de la toma de puntos de control identificables en cada una de las imágenes a trabajar, que consistieron en sitios distribuidos de forma sistemática en áreas con alto grado de confusión por la reflectancia de las imágenes, la exposición, el ruido y la nubosidad.

Clasificación digital

Para la clasificación de las imágenes, se utilizó el método de clasificación supervisada a partir de la generación de ortomosaicos. Para la detección de cambios se utilizó el software Quantum GIS "Las Palmas 2.18.25" de código abierto (QGIS Development Team 2020).

La corrección atmosférica a las imágenes de cada período de tiempo se realizó en la sección pre-procesamiento con la activación de la opción DOS1 y pansharpening con el complemento de clasificación semiautomática (SCP). A continuación, las imágenes se recortaron y sometiendo al algoritmo de clasificación no supervisada K-Means, que agrupa los valores de celda en clases con el método de análisis de conglomerados de datos multivariados (Sandoval-García *et al.* 2021b).

Se generó información relacionada con los distintos usos de suelo, cobertura vegetal y tipo de vegetación, la cual se comparó con la desarrollada por la CONAFOR (2014) y el INEGI (2022a), y se obtuvo una clasificación de diferentes usos de suelo: agricultura, asentamientos humanos, caminos, líneas de transmisión eléctrica y cuerpos de agua; así como coberturas forestales (bosque de encino, bosque de encino-pino, bosque de pino-encino, matorral desértico rosetófilo, matorral espinoso tamaulipeco, matorral submontano, matorral xerófilo, pastizal y selva baja espinosa caducifolia) distribuidas en el municipio

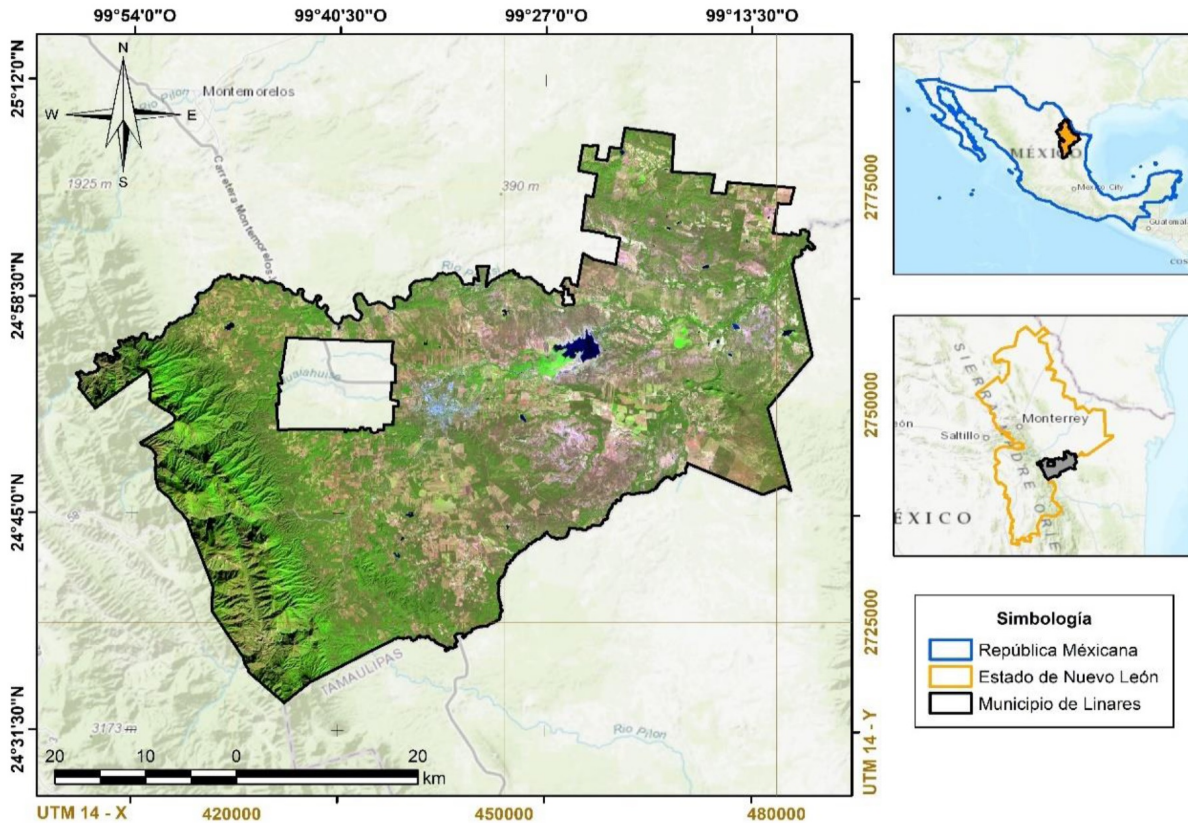


Figura 1. Localización del municipio de Linares, delimitado en color negro. El espacio en color blanco corresponde al municipio de Hualahuis, por lo tanto, geo-espacialmente no forma parte del municipio de Linares.

de Linares, Nuevo León. La información obtenida se validó con los antecedentes de uso de suelo en el área de estudio, investigaciones previas y recorridos en campo.

Validación de información

Para el cálculo de la concordancia y precisión de los resultados de clasificación de las imágenes satelitales de alta resolución se utilizó el módulo *r.kappa* en GRASS 7.6.0 (QGIS Development Team 2020), en el cual se generó una matriz de error y se determinó el índice de Kappa, mediante la siguiente ecuación (Quezada *et al.* 2022):

$$K = \frac{P_o - P_e}{1 - P_e}$$

Dónde: P_o = Concordancia observada, P_e = Concordancia esperada por azar, y $1 - P_e$ = Máxima concordancia potencial no correspondida a la casualidad.

Los criterios utilizados para la interpretación del coeficiente de Kappa son los propuestos Landis y Koch (1977), mismos que se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1. Índice Kappa y sus valores de concordancia.

Índice Kappa	Fuerza de Acuerdo
<0.00	Ningún acuerdo
0.00 - 0.20	Leve
0.21 - 0.40	Pobre
0.41 - 0.60	Moderado
0.61 - 0.80	Sustancial
0.81 - 1.00	Acuerdo casi perfecto

Análisis multitemporal

Para calcular los cambios (aumento o pérdida) de cobertura vegetal y de uso de suelo, se generó una tabulación cruzada entre cinco períodos de tiempo diferentes: 1995-2008, 2008-2014, 2014-

2021 y 1995-2021. Se calcularon el cambio neto, la tasa de cambio y el cambio relativo porcentual para cada tipo de cobertura vegetal o uso de suelo a lo largo del tiempo.

El cambio neto se obtuvo de la diferencia de área forestal entre dos puntos en el tiempo. Cuando el resultado del cambio neto es positivo significa que ha habido una ganancia general en el área forestal y cuando es negativo significa una pérdida general de área forestal (FAO 2020):

Cambio neto de la superficie forestal = ganancias (expansión forestal) – pérdidas (deforestación)

Para el cálculo de la tasa de cambio (RΔ) se empleó la siguiente ecuación (Meshesha et al. 2016):

$$R\Delta = \left(\frac{ha}{años}\right) \frac{Z - X}{W}$$

Dónde: RΔ: Tasa de cambio, Z: Cobertura vegetal o uso de suelo en el tiempo final en ha, X: Cobertura vegetal o uso de suelo en el tiempo inicial en ha, y W: Intervalo de tiempo entre Z y X en años.

Para el cálculo del cambio relativo porcentual (ΔA %) se empleó la siguiente ecuación (Meshesha et al. 2016):

$$\Delta A(\%) = \frac{At2 - At1}{At1} \times 100$$

Dónde: ΔA (%): Cambio relativo porcentual, At2: Cobertura vegetal o uso de suelo en el tiempo final, At1: Cobertura vegetal o uso de suelo en el tiempo inicial.

Tasa de deforestación anual

Los cambios en la cobertura del suelo se identificaron mediante la comparación del conjunto de 2 mapas de cobertura vegetal y de uso de suelo, creando nuevos mapas que indicaron la transición existente entre los años de estudio. Con los datos obtenidos en el procesamiento de las imágenes se calculó la tasa de deforestación anual, la cual consiste en comparar la cobertura del suelo de un mismo sitio en dos períodos de tiempo diferentes, para lo cual se utilizó la ecuación propuesta por Puyravaud

(2003):

$$r = \left(\frac{1}{t_2 - t_1}\right) \times \ln\left(\frac{A_2}{A_1}\right) \times 100$$

Dónde: A1: Cobertura vegetal o uso de suelo en el tiempo inicial, A2: Cobertura vegetal o uso de suelo en el tiempo final, T1: Período inicial, y T2: Período final.

Un valor “r” positivo indica aumento de la cobertura vegetal, mientras que un valor negativo demuestra una pérdida de cobertura.

RESULTADOS

Se obtuvieron los mapas con las coberturas de suelo del municipio de Linares, Nuevo León durante los años 1995, 2008, 2014 y 2021, los cuales se utilizaron de base para el análisis de los cambios ocurridos durante este período de tiempo (Figura 2). La clasificación de las imágenes presentó valores promedios de índice de Kappa de 0.76, que se consideran dentro de un nivel de precisión sustancial.

En los años de 1995 y 2008 el matorral submontano dominaba la cobertura de suelo del municipio de Linares con 20 647.25 ha (43.70%) y 15 066.87 ha (35.23%), respectivamente; seguido del pastizal con 13 812.02 ha (29.20%) y 15 047.15 ha (35.19%), respectivamente. Sin embargo, para los años 2014 y 2021, el pastizal mostró la mayor cobertura de suelo con 15 633.37 ha (36.70%) y 16 310.90 ha (38.10%), respectivamente. Los bosques de encino, encino-pino y pino-encino, presentaron la menor cobertura del municipio y durante el período de estudio (1995-2021) disminuyeron en 7.73 ha, 12.74 ha y 23.95 ha, respectivamente (Tabla 2). Por otro lado, durante el período de estudio (1995-2021), el matorral espinoso tamaulipeco, el mezquital xerófilo y la selva baja espinosa caducifolia, mostraron un incremento en la cobertura del suelo de 290.09 ha, 342.73 ha y 752.62 ha, respectivamente. Con respecto a los cuerpos de agua, estos disminuyeron durante el período de estudio en 2 553.21 ha, lo cual se aprecia claramente en la Figura 3; mientras que los caminos se incrementaron en 104.36 ha (Tabla 2).

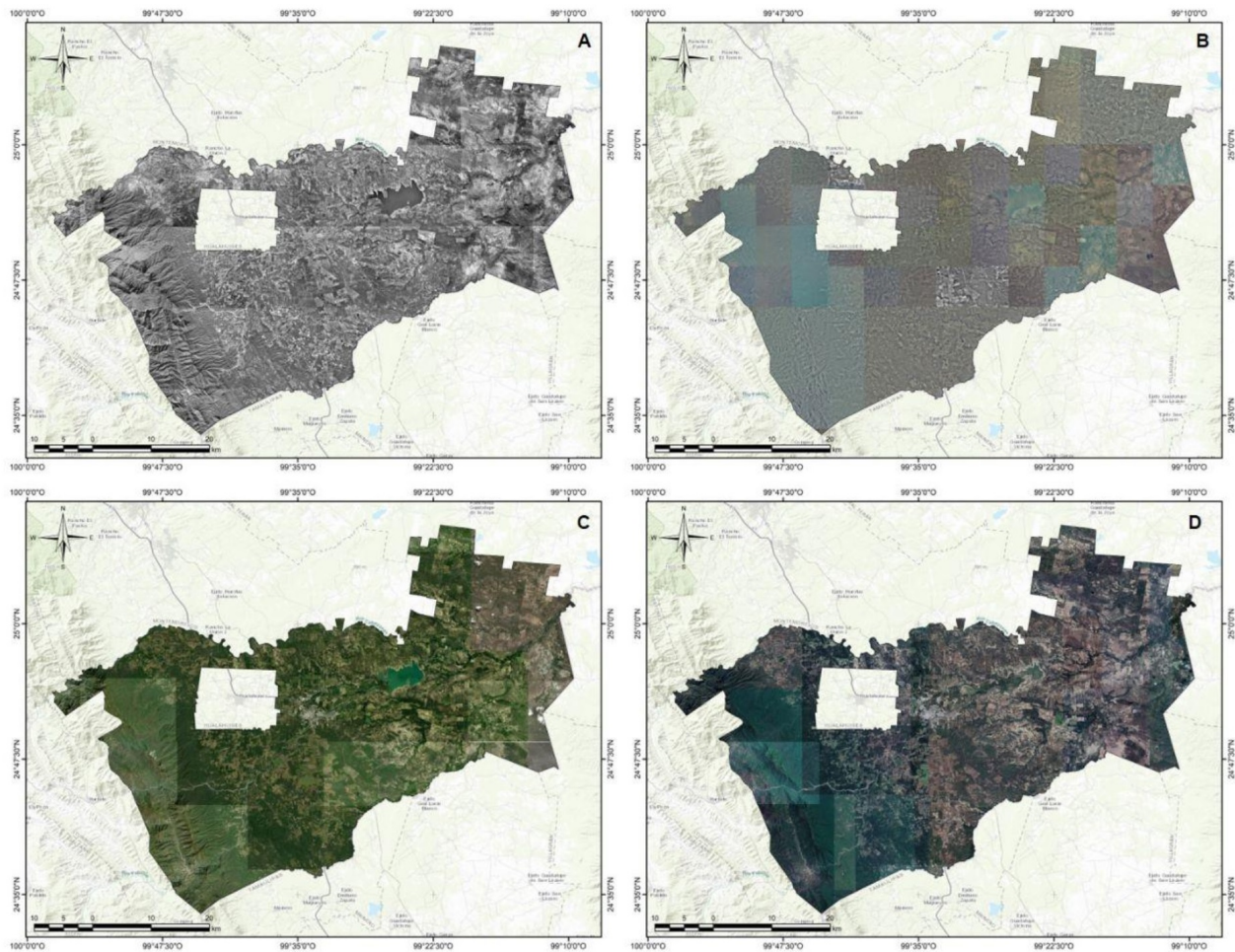


Figura 2. Ortomosaicos del municipio de Linares, Nuevo León de los años 1995 (A), 2008 (B), 2014 (C) y 2021 (D).

Tabla 2. Cobertura total de los años 1995, 2008, 2014 y 2021.

Tipo de suelo	1995		2008		2014		2021	
	ha	%	ha	%	ha	%	ha	%
BE	14.10	0.00	10.25	0.00	8.60	0.00	6.37	0.00
BE-P	16.34	0.00	11.41	0.00	6.42	0.00	3.60	0.00
BP-E	41.47	0.10	30.40	0.10	25.46	0.10	17.52	0.00
MDR	1,793.47	3.80	1,748.13	4.10	1,734.88	4.10	1,708.01	4.00
MET	2,261.37	4.80	2,281.10	5.30	2,306.88	5.40	2,551.45	6.00
MS	20,647.25	43.70	15,066.87	35.20	14,983.70	35.20	14,951.96	34.90
MX	1,100.48	2.30	1,369.95	3.20	1,402.30	3.30	1,443.20	3.40
Pas	13,812.02	29.20	15,047.15	35.20	15,633.37	36.70	16,310.90	38.10
SBEC	242.32	0.50	259.26	0.60	348.97	0.80	994.94	2.30
Ca	4,047.84	8.60	3,629.16	8.50	2,758.84	6.50	1,494.64	3.50
Cam	3,279.36	6.90	3,310.25	7.70	3,354.60	7.90	3,383.73	7.90
Total	47,256.03	100.00	42,763.95	100.00	42,564.02	100.00	42,866.31	100.00

Bosque de Encino = BE, Bosque de Encino-Pino = BE-P, Bosque de Pino-Encino = BP-E, Matorral Desértico Rosetófilo = MDR, Matorral Espinoso Tamauilpeco = MET, Matorral Submontano = MS, Mezquital Xerófilo = MX, Pastizal = Pas, Selva Baja Espinosa Caducifolia = SBEC, Cuerpos de agua = Ca, Caminos = Cam.

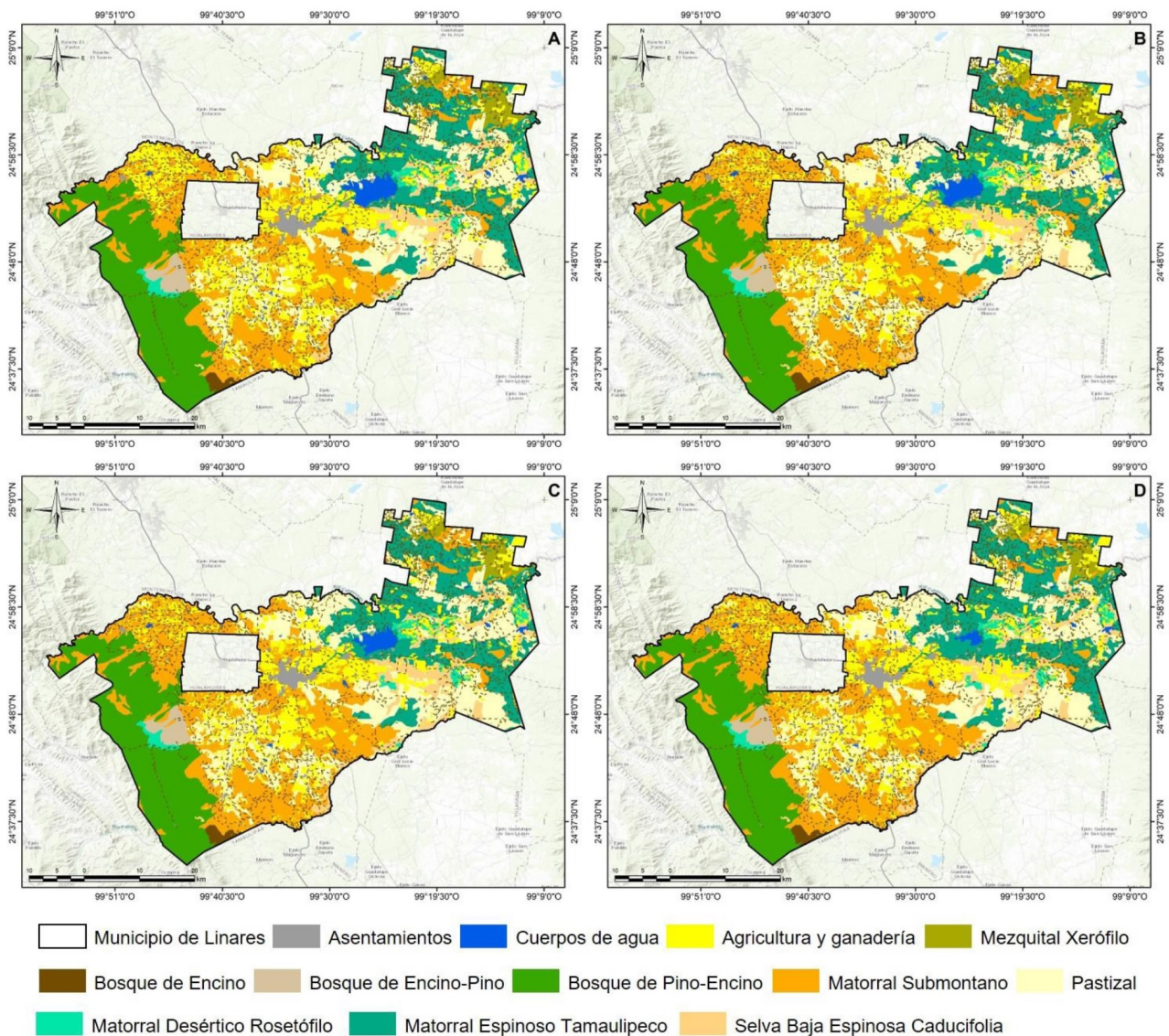


Figura 3. Mapas de cobertura de suelo de los años 1995 (A), 2008 (B), 2014 (C) y 2021 (D).

Las tasas de cambio relativa de los bosques de encino, encino-pino y pino-encino, así como de selva baja espinosa caducifolia, registradas en todo el período de estudio (1995-2021), fueron de -54.83, -77.97, -57.75 y 310.58%, respectivamente; lo que indica un cambio importante en estos tipos de vegetación (Figura 4).

Referente a la tasa de deforestación anual por período de estudio, el bosque de encino-pino mostró la mayor pérdida de cobertura de suelo durante el

2008-2014 con -9.58%, seguido de los cuerpos de agua durante el 2014-2021 con -8.76%. Mientras que la selva baja espinosa caducifolia mostró la mayor ganancia de cobertura de suelo en el período 2014-2021 con 14.97%, seguido del 2008-2014 con 4.95% (Figura 5). En este mismo sentido, al estimar la tasa de deforestación anual de todo el período de estudio (1995-2021) se observó que las comunidades de bosques son las que representan las mayores pérdidas de cobertura de suelo junto con los cuerpos de

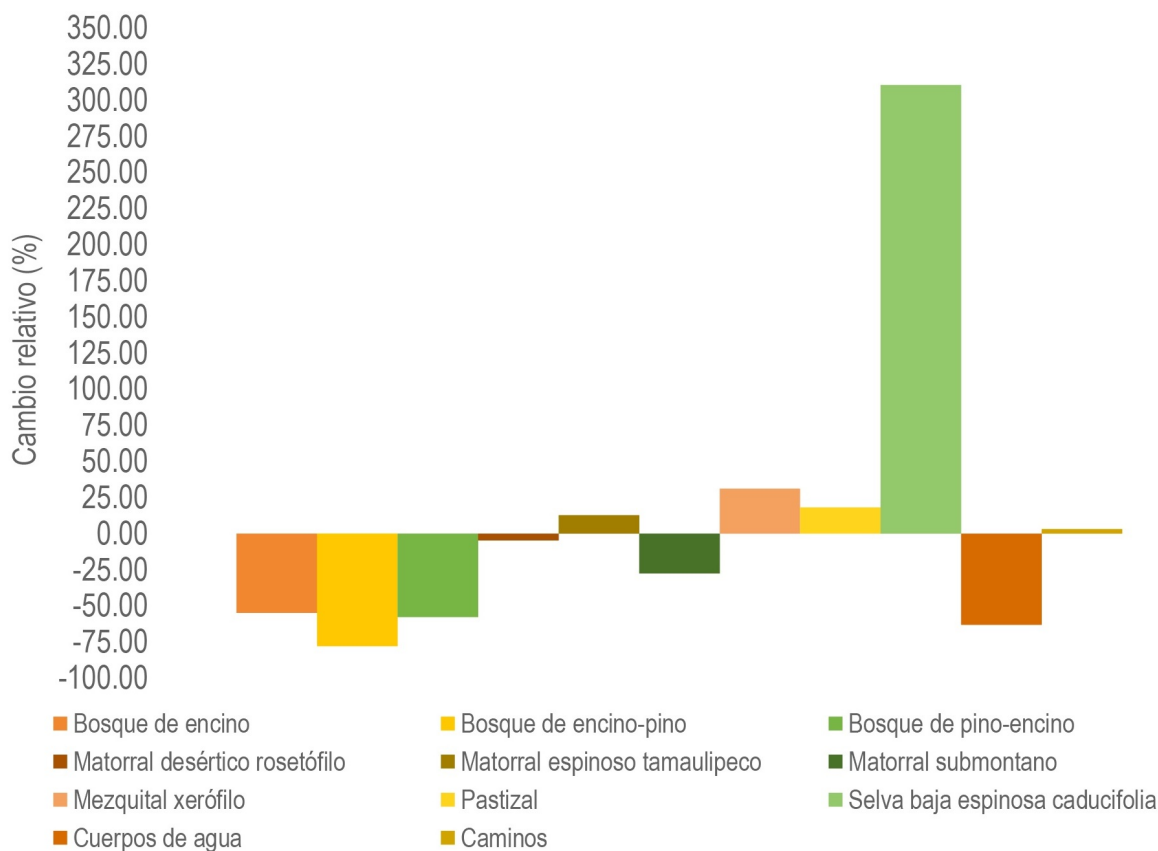


Figura 4. Cambio relativo en la cobertura del suelo del municipio de Linares, Nuevo León durante el período de estudio (1995-2021).

agua (Figura 6).

DISCUSIÓN

Los resultados indican que en un lapso de 26 años (1995-2021) el municipio de Linares perdió el 61.77% de sus bosques de encino-pino, pino-encino y encino, mostrando las mayores tasas de deforestación en este período de estudio con -5.82, -3.31 y -3.06%, respectivamente. Estos resultados difieren a los registrados en el Parque Nacional Cumbres de Monterrey, que en un lapso de 18 años (2000-2018) los bosques de encino-pino, pino-encino y encino, mostraron recuperación de cobertura vegetal como resultado de su capacidad de resiliencia ante disturbios naturales o antropogénicos (Sandoval-García *et al.* 2021a).

Por otro lado, se determinó que los tipos de matorral que registraron pérdida de cobertura vegetal durante todo el período de estudio (1995-2021), fueron el matorral submontano y el matorral desértico rosetófilo. Los cuales registraron pérdidas de cobertura del 27.58 y 4.8%, respectivamente; así como tasas de deforestación anual de -1.24 y -0.19%, respectivamente. Estos resultados, están relacionados con investigaciones previas realizadas en el área de estudio, que indican que el aprovechamiento intensivo de la vegetación en el municipio data de los años 20's del siglo pasado (García-Hernández y Jurado 2008). Durante los años 70's a 90's del siglo pasado, los matorrales fueron impactados de manera severa por actividades antrópicas como los desmontes, la extracción selectiva de productos naturales, el pastoreo extensivo y el establecimiento de cultivos agrícolas, se estimó una tasa anual de remoción de

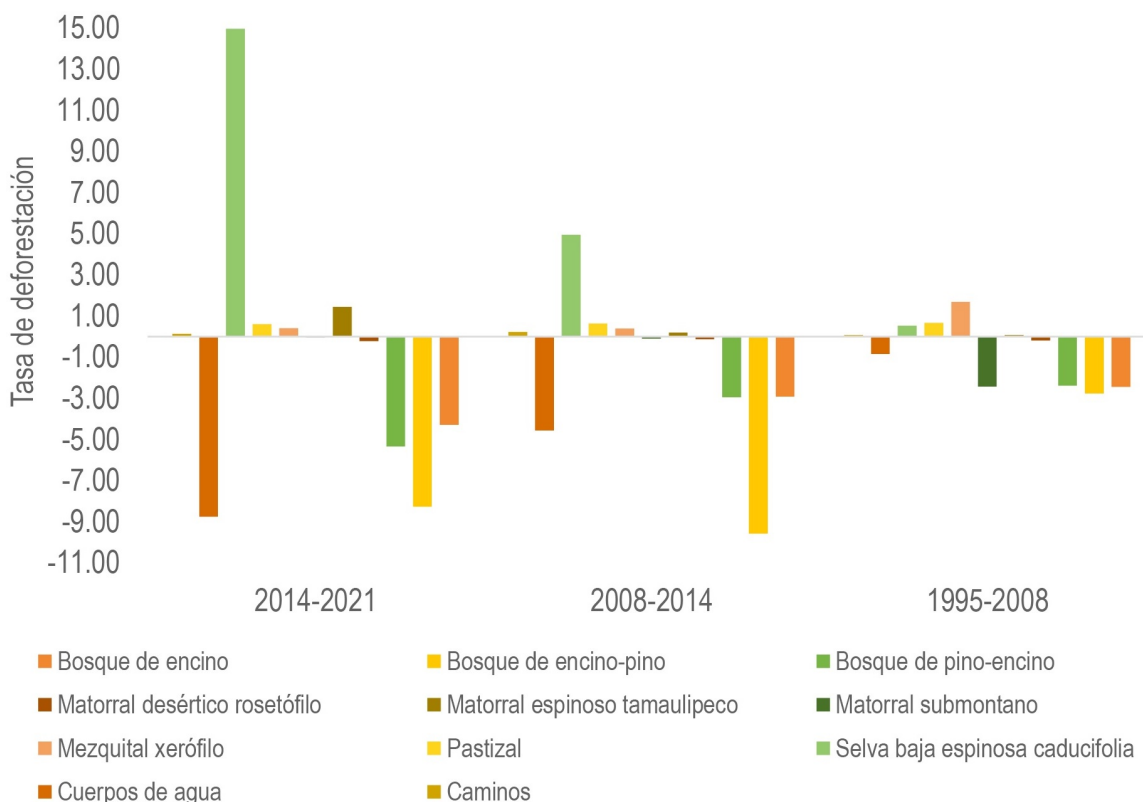


Figura 5. Tasa de deforestación anual en el municipio de Linares, Nuevo León, durante los períodos 1995-2008, 2008-2014 y 2014-2021.

la vegetación dentro del rango 0.94 a 1.06% de la superficie total del municipio y sólo menos del 1% de la superficie con vegetación de matorral original, tuvo como consecuencia la degradación del suelo, pérdida de biodiversidad, cambios micro-climáticos sensibles y patrones de sucesión vegetal secundaria (García-Hernández y Jurado 2008). Una investigación realizada en la región citrícola del estado de Nuevo León que incluye al municipio de Linares, reportó que durante el período de 1976-2008, el matorral submontano registró una pérdida del 33% de su superficie, mientras que todas las áreas de matorral en conjunto registraron una pérdida del 40%. También se encontró que para el año 2008, sólo el 33% de la superficie de la región citrícola estaba ocupada por vegetación primaria (Pando-Moreno *et al.* 2014). Esta investigación coincide con los resultados obtenidos en el presente estudio, en el cual el matorral submontano registró una pérdida del 27.58% de su superficie, mientras que todas las áreas de ma-

torral en conjunto registraron una pérdida del 32.35%.

En el estado de Nuevo León se han perdido extensas áreas de matorral por la construcción de asentamientos humanos; así como por el aprovechamiento, manejo y uso de esta comunidad vegetal por habitantes de áreas rurales para la elaboración de artículos de carpintería, carbón, postería para cercas, artesanías de madera y forraje (Estrada-Castillón *et al.* 2012, Alanís-Rodríguez *et al.* 2015). Estos datos coinciden con los resultados obtenidos en el presente estudio, los cuales demuestran la pérdida de 5 695.29 ha de matorral submontano y 85.46 ha de matorral desértico rosetófilo, durante el período de estudio (1995-2021).

A diferencia de los bosques y de los matorrales submontano y desértico rosetófilo que mostraron una pérdida de cobertura de suelo durante el período de estudio, la selva baja espinosa caducifolia presentó una ganancia del 310.58%. Considerando los antecedentes de uso de suelo en el área de estudio, in-

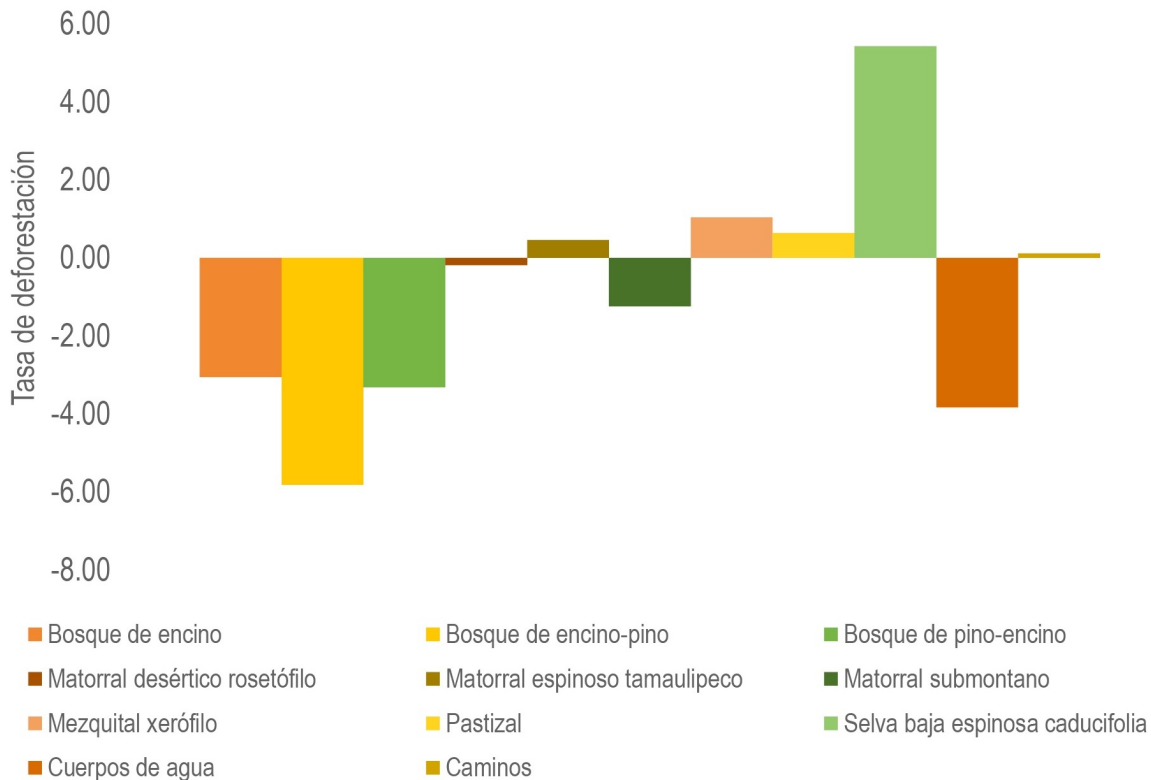


Figura 6. Tasa de deforestación anual en el municipio de Linares, Nuevo León, durante el período 1995-2021.

investigaciones previas y los recorridos en campo, este aumento corresponde a un matorral regenerado posterior al abandono de terrenos agrícolas y pecuarios (Alanís-Rodríguez *et al.* 2008, Pequeño-Ledezma *et al.* 2012, Leal-Elizondo *et al.* 2018). Durante la validación en campo, se confirmó que este matorral regenerado está conformado por especies de la familia Fabaceae, principalmente *Vachellia farnesiana* ya que tienen la capacidad de establecerse en suelos con baja disponibilidad de nitrógeno (Jiménez *et al.* 2009, Patiño-Flores *et al.* 2022).

El pastizal, mostró una ganancia del 18.09% durante el período de estudio. De 1995-2008 mostró el mayor incremento con una ganancia de 1 235.13 ha, presentando un comportamiento similar en los siguientes períodos de 2008-2014 y 2014-2021 con ganancias de 586.22 ha y 677.53 ha, respectivamente (Tabla 3). Resultados similares a los registrados en el municipio de Nacajuca, Tabasco en el cual en el período de 2000-2008 el pastizal tuvo

una ganancia de 2 168 ha; mientras que en el período 2008-2017 el pastizal presentó el mayor incremento con una ganancia de 4 378 ha (Palomeque-De la Cruz *et al.* 2021). El aumento de pastizal en el municipio de Linares se debe a la actividad pecuaria, ya que se realiza el cambio de uso de suelo de comunidades vegetales nativas a el establecimiento de pastos exóticos para alimentar al ganado vacuno (Jiménez *et al.* 2009).

Con respecto a los cuerpos de agua, éstos mostraron disminución del -3.83%. Los cambios en la cobertura de suelo, perdiendo la capa vegetal de bosques y matorral, lo que impacta en la disminución de las aportaciones hídricas debido a su pérdida de capacidad de infiltración y recarga de acuíferos (Castelán-Vega *et al.* 2007, Pérez-Ortega *et al.* 2018). Aunado a la actividad agrícola que demanda el uso del agua, lo que impacta de forma negativa en la disponibilidad de los recursos hídricos en cualquier época del año (Martínez-Austria *et al.* 2010). Una

Tabla 3. Cambio neto, cambio relativo y tasa de cambio ocurridos durante los períodos 1995-2008, 2008-2014, 2014-2021 y 1995-2021.

Tipo de suelo	Cambio neto (ha)				Cambio relativo (%)			Tasa de cambio (ha/año)				
	1995-2008	2008-2014	2014-2021	1995-2021	1995-2008	2008-2014	2014-2021	1995-2008	2008-2014	2014-2021	1995-2021	
BE-P	-4.93	-4.99	-2.82	-12.74	-30.18	-43.73	-43.93	-77.97	-0.38	-0.83	-0.40	-0.49
BP-E	-11.07	-4.94	-7.94	-23.95	-26.69	-16.25	-31.19	-57.75	-0.85	-0.82	-1.13	-0.92
MDR	-45.34	-13.25	-26.87	-85.46	-2.53	-0.76	-1.55	-4.77	-3.49	-2.21	-3.84	-3.29
MET	19.73	25.78	244.57	290.09	0.87	1.13	10.60	12.83	1.52	4.30	34.94	11.16
MS	-5580.38	-83.17	-31.74	-5695.29	-27.03	-0.55	-0.21	-27.58	-429.26	-13.86	-4.53	-219.05
MX	269.47	32.35	40.90	342.73	24.49	2.36	2.92	31.14	20.73	5.39	5.84	13.18
Pas	1235.14	586.22	677.53	2498.88	8.94	3.90	4.33	18.09	95.01	97.70	96.79	96.11
SBEC	16.94	89.70	645.98	752.62	6.99	34.60	185.11	310.58	1.30	14.95	92.28	28.95
Ca	-418.68	-870.32	-1264.20	-2553.21	-10.34	-23.98	-45.82	-63.08	-32.21	-145.05	-180.60	-98.20
Cam	30.89	44.35	29.13	104.36	0.94	1.34	0.87	3.18	2.38	7.39	4.16	4.01

Bosque de Encino = BE, Bosque de Encino-Pino = BE-P, Bosque de Pino-Encino = BP-E, Matorral Desértico Rosetófilo = MDR, Matorral Espinoso Tamaulipeco = MET, Matorral Submontano = MS, Mezquital Xerófilo = MX, Pastizal = Pas, Selva Baja Espinosa Caducifolia = SBEC, Cuerpos de agua = Ca, Caminos = Cam.

alternativa de manejo sustentable para mejorar la capacidad de infiltración y recarga de acuíferos es la implementación de programas de reforestación con especies nativas y la recuperación de suelos (CONAFOR 2010), en conjunto con la promoción de prácticas agrícolas sustentables como la eficiencia en el riego, el tratamiento y la utilización de aguas residuales (López-García *et al.* 2017).

CONCLUSIONES

Los resultados multitemporal evidencian la pérdida de cobertura vegetal en los bosques, matorrales submontano y desértico rosetófilo, entre los años 1995 y 2021 en el municipio de Linares Nuevo León. Los resultados sirven como base para el diseño de políticas públicas y programas de conservación y manejo sostenible de los recursos naturales. También

pueden servir de base para realizar simulaciones de la dinámica de cambio de uso de suelo y vegetación para períodos futuros, basadas en las tendencias del período estudiado y de esta manera proporcionar información útil para el desarrollo de estudios climáticos y ambientales. Las imágenes de alta resolución son herramientas importantes en la toma de decisiones durante la priorización de áreas para la implementación estrategias de restauración ecológica y manejo integral de los ecosistemas forestales.

AGRADECIMIENTOS

Al personal de la empresa RENAC S.A. de C.V. y a la Red de Investigación en Ecología y Restauración de Ecosistemas Forestales por el apoyo en las actividades de campo de verificación del tipo de cobertura vegetal.

LITERATURA CITADA

- Alanís-Rodríguez E, Jiménez-Pérez J, Aguirre-Calderón O, Treviño-Garza E, Jurado Ybarra E, González-Tagle M (2008) Efecto del uso del suelo en la fitodiversidad del matorral espinoso tamaulipeco. Ciencia UANL XI: 56-62.
- Alanís-Rodríguez E, Jiménez-Pérez J, Mora-Olivo A, Martínez-Ávalos JG, Mata-Baldera JM, Chávez-Costa AC, Rubio-Camacho EA (2015) Estructura y diversidad del matorral submontano contiguo al área metropolitana de Monterrey, Nuevo León, México. Acta Botánica Mexicana 113: 1-19.
- Bocco G, Mendoza M, Masera OR (2001) La dinámica del cambio del uso del suelo en Michoacán. Una propuesta metodológica para el estudio de los procesos de deforestación. Investigaciones Geográficas 44: 18-38.
- Brovelli MA, Sun Y, Yordanov V (2020) Monitoring forest change in the Amazon using multi-temporal remote

- sensing data and machine learning classification on Google Earth Engine. *International Journal of Geo-Information* 9: 1-21. DOI: 10.3390/ijgi9100580.
- Castelán-Vega R, Ruiz-Careaga J, Linares-Fleites G, Pérez-Avilés R, Tamariz-Flores V (2007) Dinámica de cambio espacio-temporal de uso del suelo de la subcuenca del río San Marcos, Puebla, México. *Investigaciones Geográficas* 64: 75-89.
- CONAFOR (2010) Programa y acciones de reforestación, conservación y restauración de suelos, incendios forestales y sanidad forestal. Primera Edición. CONAFOR. Zapopan, Jalisco, México. 113p.
- CONAFOR (2014) Inventario Estatal Forestal y de Suelos - Nuevo León 2014. Primera Edición. CONAFOR. Zapopan, Jalisco, México. 166p.
- CONAFOR (2020) Estimación de la tasa de deforestación bruta en México para el período 2001-2018 mediante el método de muestreo. Documento Técnico. Jalisco, México. 19p.
- Dávila-Pórcel RA, de León-Gómez H, Aranda-Maltez LM (2013) Hidrogeología urbana de la ciudad de Linares, México. En González N, Kruse EE, Trovatto MM, Laurencena P (ed) *Temas actuales de la hidrología subterránea 2013*. Primera edición. Editorial de la Universidad Nacional de la Plata (Edulp). Buenos Aires, Argentina. pp: 71-78.
- Emanuelli-Avilés P, Duarte-Castañeda E, Milla-Araneda F, Casco F, Orellana O, López S (2016) Análisis de cambios de la cobertura forestal y uso de la tierra mediante imágenes satelitales de alta resolución espacial, período 2010-2015. Área de influencia del mecanismo socioambiental del Diquís. Programa REDD/CCAD-GIZ. Costa Rica. 49p.
- Estrada-Castillón E, Villarreal-Quintanilla JA, Jurado-Ybarra E, Cantú-Ayala C, García-Aranda MA, Sánchez-Salas J, Jiménez-Pérez J, Pando-Moreno M (2012) Clasificación, estructura y diversidad del matorral submontano adyacente a la planicie costera del Golfo Norte en el noreste de México. *Botanical Sciences* 90: 37-52.
- FAO (2020) Global forest resources assessment 2020 main report. FAO. Rome. 186p.
- FAO, PNUMA (2020) El estado de los bosques del mundo 2020. Los bosques, la biodiversidad y las personas. Roma, Italia. 197p. DOI: 10.4060/ca8642es. Fecha de consulta: 27 de marzo de 2023.
- Galicia-Sarmiento L, García-Romero A, Gómez-Mendoza L, Isabel-Ramírez M (2007) Cambio de uso de suelo y degradación ambiental. *Academia Mexicana de Ciencias* 58 <https://www.revistaciencia.amc.edu.mx/index.php/ediciones-anteriores?task=view&id=135>. Fecha de consulta 24 de marzo de 2023.
- García-Hernández J, Jurado E (2008) Caracterización del matorral con condiciones prístinas en Linares N.L., México. *Revista Ra Ximhai* 4: 1-21.
- INEGI (2010) Compendio de información geográfica municipal 2010. Linares, Nuevo León. 10p.
- INEGI (2017) Anuario estadístico y geográfico de Nuevo León 2017. México. 614p.
- INEGI (2021) Panorama sociodemográfico de Nuevo León: Censo de población y vivienda 2020. 127p.
- INEGI (2022a) Conjunto de datos vectoriales de la carta topográfica escala 1:250 000 por entidad federativa (2021), Nuevo León. Edición 2022.
- INEGI (2022b) Ortoimágenes. <https://www.inegi.org.mx/temas/imagenes/ortoimagenes/#Descargas>. Fecha de consulta: 02 de febrero de 2023.

- Jiménez-Pérez J, Alanís-Rodríguez E, Aguirre-Calderón O, Pando-Moreno M, González-Tagle M (2009) Análisis sobre el efecto del uso del suelo en la diversidad estructural del matorral espinoso tamaulipeco. *Madera y Bosques* 15: 5-20.
- Landis, JR, Koch GG (1977) The Measurement of Observer Agreement for Categorical Data. *Biometrics* 33: 159-174.
- Leal-Elizondo NA, Alanís-Rodríguez E, Mata-Balderas JM, Treviño-Garza EJ, Yerena-Yamallel JI (2018) Estructura y diversidad de especies leñosas del matorral espinoso tamaulipeco regenerado postganadería en el noreste de México. *Polibotánica* 45: 75-88.
- Leija-Loredo EG, Reyes-Hernández H, Reyes-Pérez O, Flores-Flores JL, Sahagún-Sánchez FJ (2016) Cambios en la cubierta vegetal, usos de la tierra y escenarios futuros en la región costera del estado de Oaxaca, México. *Madera y Bosques* 22: 125-140.
- López-García TG, Manzano MG, Ramírez AI (2017) Disponibilidad hídrica bajo escenarios de cambio climático en el Valle de Galeana, Nuevo León, México. *Tecnología y Ciencias del Agua* 1: 105-114.
- Martínez-Austria P, Patiño-Gómez C, Montero-Martínez MJ, Pérez-López JL, Ojeda-Bustamante W, Mundo-Molina MD, Hernández-Barrios L (2010) Efectos del cambio climático en los recursos hídricos. En Jiménez-Cisneros B, Torregrosa y Armentia ML, Aboites-Aguilar L. *El agua en México: cauces y encauces*. Primera Edición. Academia Mexicana de Ciencias. México. pp: 529-562.
- Meshesha TW, Tripathi SK, Khare D (2016) Analyses of land use and land cover change dynamics using GIS and remote sensing during 1984 and 2015 in the Beressa Watershed Northern Central Highland of Ethiopia. *Modeling Earth Systems and Environment* 2: 168. DOI: 10.1007/s40808-016-0233-4
- Palomeque-De la Cruz MA, Ruiz-Acosta SD, Ramos-Reyes R, Magaña-Alejandro MA, Galindo-Alcántara A (2021) Modelación de cambios de cobertura y uso de suelo en Nacajuca, Tabasco. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 12: 655-669.
- Pando-Moreno M, Pérez-Damián JL, Mendoza-Aguilar DO (2014) Cambio de uso de suelo y fragmentación del paisaje. En: López-López A, Pando-Moreno M (ed) *Región Citrícola de Nuevo León. Su complejidad territorial en el marco global*. Primera edición. Universidad Nacional Autónoma de México. México. pp: 159-178.
- Patiño-Flores AM, Alanís-Rodríguez E, Molina-Guerra VM, Jurado E, González-Rodríguez H, Aguirre-Calderón OA, Collantes-Chávez-Costa A (2022) Regeneración natural en un área restaurada del matorral espinoso tamaulipeco del Noreste de México. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios* 9: 1-7. DOI: 10.19136/era.a9n1.2853.
- Pequeño-Ledezma MA, Alanís-Rodríguez E, Jiménez-Pérez J, González-Tagle MA, Yerena-Yamallel JI, Cuellar-Rodríguez G, Mora-Olivo A (2012) Análisis de la restauración pasiva post-pecuaria en el matorral espinoso tamaulipeco del noreste de México. *Ciencia UAT* 7: 48-53.
- Pérez-Ortega DJ, Segovia-Ortega JA, Cabrera-Moncayo PC, Delgado-Vargas IA, Martins-Pompeo ML (2018) Uso del suelo y su influencia en la presión y degradación de los recursos hídricos en cuencas hidrográficas. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental* 9: 41-58.
- Puyravaud JP (2003) Standardizing the calculation of the annual rate of deforestation. *Forest Ecology and Management* 177: 593-596.
- QGIS Development Team (2020) QGIS Geographic Information System. Open-Source Geospatial Foundation Project. <https://qgis.org>. Fecha de consulta 02 de febrero de 2023.

- 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.
- Sánchez-Reyes UJ, Niño-Maldonado S, Barrientos-Lozano L, Treviño-Carreón J (2017) Assessment of land use-cover changes and successional stages of vegetation in the natural protected area Altas Cumbres, North-eastern Mexico, using land satellite imagery. *Remote Sensing* 9: 1-33. DOI: 103390/rs9070712.
- Sandoval-García R, Jiménez-Pérez J, Yerena-Yamallel JI, Aguirre-Calderón OA, Alanís-Rodríguez E, Vinicio M (2021a) Análisis multitemporal del uso del suelo y vegetación en el Parque Nacional Cumbres de Monterrey. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 66: 70-95.
- Sandoval-García R, González-Cubas R, Jiménez-Pérez J (2021b) Análisis multitemporal del cambio en la cobertura del suelo en la Mixteca Alta Oaxaqueña. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 66: 96-121.
- Sanhouse-García AJ, Bustos-Terrones Y, Rangel-Peraza JG, Quevedo-Castro A, Pacheco C (2016) Multi-temporal analysis for land use and land cover changes in an agricultural region using open source tools. *Remote Sensing Applications: Society and Environment* 8: 278-290.
- SASPlanet (2022) SASPlanet Software. Version 181221. SASPlanet Development Team. <https://www.sasgis.org>. Fecha de consulta 02 de febrero de 2023.
- Vázquez-Ochoa LA, Correa-Sandoval A, Vargas-Castilleja RC, Vázquez-Sauceda ML, Rodríguez-Castro JH (2021) Modelo hidrológico, calidad del agua y cambio climático: soporte para la gestión hídrica de la cuenca del río Soto la Marina. *Ciencia UAT* 16: 20-41
- Velázquez A, Mas JF, Díaz-Gallegos JR, Mayorga-Saucedo R, Alcántara PC, Castro R, Fernández T, Bocco G, Ezcurra E, Palacio JL (2002) Patrones y tasas de cambio de uso de suelo en México. *Gaceta Ecológica* 62: 21-37.