

Landscape and vegetation analysis in an area of wind farms in the northeast of Mexico

Análisis del paisaje y la vegetación en una zona de parques eólicos del noreste de México

José M. Mata-Balderas^{1,2}; Javier Francisco-Santos^{1,3};
Eduardo Treviño-Garza²; Elizabeth Mata-Balderas^{1,3*}

¹Gestión Estratégica y Manejo Ambiental, S. C. (GEMA, S. C.). Calle Gema 1206, Joyas del Pedregal 4° sector. C. P. 66648. Apodaca, Nuevo León, México.

²Universidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de Ciencias Forestales. Carretera Linares-Cd. Victoria km 145. C. P. 67700. Linares, Nuevo León, México.

³Biólogos y Silvicultores Forestales por el Ambiente, A. C. Calle Gema 1206, Joyas del Pedregal 4° sector. C. P. 66648. Apodaca, Nuevo León, México.

*Corresponding author: elizabeth.mata.balderas@gmail.com; tel.: +52 81 1911 4824.

Abstract

Introduction: Land use change due to wind infrastructure establishment can cause ecosystem fragmentation. The result is a new configuration and spatial composition that can be studied by means of landscape and vegetation evaluation.

Objective: We aimed to characterize the landscape elements in a wind farm area and to recognize the structure and diversity of the fragments identified in the Tamaulipan thornscrub (TT).

Materials and methods: Land uses were identified using the Normalized Distribution Vegetation Index, whose elements were classified and analyzed using landscape metrics. The plant community preserved in fragments of TT was evaluated by analyzing its structure and tree measurement variables. Diversity and richness indices were calculated, and a Bray-Curtis plot was developed to determine the level of similarity between sites based on species abundance.

Results and discussion: The multipurpose productive system comprising the study area (14 031.98 ha) included five land uses: agriculture (53.53 %), grassland (25.31 %), TT vegetation (20.63 %), roads (0.51 %) and wind turbines (0.01 %). Fabaceae, Poaceae and Cactaceae families had a greater presence in TT fragments. absolute abundance, canopy cover and average height of tree-shrub stratum was 6824 individuals·ha⁻¹, 224.19 m²·ha⁻¹ and 1.64 m, respectively.

Conclusions: The spatial configuration and floristic composition of the fragments would facilitate the creation of biological corridors under ecological restoration measures. Floristic composition parameters were higher compared to those reported in other TT conservation areas.

Keywords: floristic composition; wind energy; fragmentation; diversity indexes; Tamaulipan thornscrub.

Resumen

Introducción: El cambio de uso de suelo por el establecimiento de infraestructura eólica puede causar fragmentación del ecosistema. El resultado es una nueva configuración y composición espacial que puede ser estudiada a través de su evaluación paisajística y vegetal.

Objetivo: Caracterizar los elementos del paisaje en una zona de parques eólicos y conocer la estructura y diversidad de los fragmentos identificados de matorral espinoso tamaulipeco (MET).

Materiales y métodos: Se identificaron los usos de suelo mediante el Índice de Vegetación de Distribución Normalizada, cuyos elementos se clasificaron y analizaron a través de métricas del paisaje. Se evaluó la comunidad vegetal conservada en fragmentos del MET, mediante el análisis de su estructura y variables dasométricas. Se calcularon índices de diversidad y riqueza y se generó una gráfica de Bray-Curtis para conocer el nivel de similitud entre sitios con base en la abundancia de especies.

Resultados y discusión: En el sistema productivo multipropósito que conforma el área de estudio (14 031.98 ha) se encontraron cinco usos de suelo: agricultura (53.53 %), pastizal (25.31 %), vegetación del MET (20.63 %), caminos (0.51 %) y aerogeneradores (0.01 %). Las familias Fabaceae, Poaceae y Cactaceae tuvieron mayor presencia en los fragmentos del MET. La abundancia absoluta, cobertura de copa y altura promedio del estrato arbóreo-arbustivo fue de 6824 individuos·ha⁻¹, 224.19 m²·ha⁻¹ y 1.64 m, respectivamente.

Conclusiones: La configuración espacial y composición florística de los fragmentos facilitaría la creación de corredores biológicos bajo medidas de restauración ecológica. Los parámetros de composición florística fueron mayores que los señalados en otras áreas de conservación del MET.

Palabras clave: composición florística; energía eólica; fragmentación; índices de diversidad; matorral espinoso tamaulipeco.

Introduction

Wind power industry development in Mexico has grown significantly in the last decade (Azamar Alonso & García Beltrán, 2021). The states with the highest production include Tamaulipas with 1 177.5 MW installed (Robles, 2017). This area is predominantly home to the Tamaulipas Thornscrub (TT), characterized by its ability to adapt to extreme climate conditions and soil nutrient fixation (Foroughbakhch et al., 2011; González-Rodríguez et al., 2016).

TT's surface area has decreased since the 1980s, mainly due to the extensive practice of livestock and agriculture (Turner & Díaz-Bautista, 2009). Just in the period from 1993 to 2002, 953,000 ha of scrubland were lost due to land use change, being the second most affected ecosystem in Mexico after rainforests (Patiño-Flores et al., 2021).

The distance between wind turbines in wind farms must be at least 5 % of their diameter (Ramírez et al., 2016), so that the wind turbines together form a large area. A common practice to reduce the impact is to install these farms in areas that already have some type of use, usually agricultural (Ecological Society of America [ESA], 2019). However, land use change due to the establishment of wind infrastructure, access roads and operational area can cause additional fragmentation to the ecosystem (Hernández-Pérez et al., 2022). This results in a new spatial configuration that is reflected in the quantity, distance, richness and shape of fragments (also referred to as patches) that make up the land uses (Rodríguez-Echeverry & Leiton, 2021). These changes can be evaluated using landscape analysis methods, such as the classification of satellite images and the calculation of landscape metrics (Altamirano et al., 2012). Satellite images are processed by means of geographic information systems, where information about vegetation cover is obtained by the Normalized Difference Vegetation Index or NDVI (Olivares & López-Beltrán, 2019). Meanwhile, landscape metrics allow obtaining information about the spatial relationships between the fragments that make up the landscape mosaic (Mateucci & Silva, 2005).

Increased fragmentation in vegetation areas reduces the habitat available for the development of species, even more when crops, roads, human settlements or induced vegetation predominate (Reyes et al., 2022). The remaining vegetation cover is a determining factor in the degree of affectation that a wind system has on fauna (Bolívar-Cimé et al., 2016). Therefore, in addition to knowing the composition and configuration of the landscape, it is important to evaluate the plant community distributed in a fragmented system, especially to document changes in the plant structure by identifying species sensitive to these changes.

Introducción

El desarrollo de la industria eólica en México ha crecido de manera significativa en la última década (Azamar Alonso & García Beltrán, 2021). Entre los estados de mayor producción destaca Tamaulipas con 1 177.5 MW instalados (Robles, 2017). En esta zona se desarrolla de manera predominante el Matorral Espinoso Tamaulipeco (MET), caracterizado por su capacidad de adaptación a condiciones climáticas extremas y fijación de nutrientes al suelo (Foroughbakhch et al., 2011; González-Rodríguez et al., 2016).

La superficie del MET ha disminuido desde la década de 1980, principalmente, por la práctica extensiva de la ganadería y agricultura (Turner & Díaz-Bautista, 2009). Tan solo en el periodo de 1993 a 2002 se perdieron 953 000 ha de matorral por cambio de uso de suelo, siendo el segundo ecosistema más afectado de México después de las selvas (Patiño-Flores et al., 2021).

En los parques eólicos, el distanciamiento entre aerogeneradores debe ser al menos del 5 % de su diámetro (Ramírez et al., 2016), por lo que el conjunto de estos conforma un área extensa. Una práctica común para disminuir el impacto es la instalación de estos parques en zonas que ya cuentan con algún tipo de aprovechamiento, usualmente agropecuario (Ecological Society of America [ESA], 2019). No obstante, el cambio de uso de suelo por el establecimiento de la infraestructura eólica, vías de acceso y área operativa pueden causar fragmentación adicional al ecosistema (Hernández-Pérez et al., 2022). Esto resulta en una nueva configuración espacial que se refleja en la cantidad, distancia, riqueza y forma de los fragmentos (referidos también como parches) que conforman los usos de suelo (Rodríguez-Echeverry & Leiton, 2021). Tales cambios se pueden evaluar a través de métodos de análisis paisajístico, como la clasificación de imágenes satelitales y el cálculo de métricas del paisaje (Altamirano et al., 2012). Las imágenes satelitales son procesadas a través de sistemas de información geográfica, donde se obtiene información acerca de las coberturas vegetales mediante el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada o NDVI por sus siglas en inglés (Olivares & López-Beltrán, 2019). Mientras que, las métricas del paisaje permiten obtener información acerca de las relaciones espaciales entre los fragmentos que conforman el mosaico paisajístico (Mateucci & Silva, 2005).

El aumento de la fragmentación en áreas de vegetación reduce el hábitat disponible para el desarrollo de las especies, más aún cuando predominan los usos de cultivos, caminos, asentamientos humanos o vegetación inducida (Reyes et al., 2022). La cobertura de la vegetación remanente es determinante en el grado de afectación que un sistema eólico ejerce sobre

The objectives of this research were a) to characterize and describe the degree of fragmentation in a wind farm with agricultural activities and, b) to recognize its structure and diversity in the fragments with vegetation use of TT. It is expected that the elements studied will serve as indicators for future studies focused on the creation of biological corridors within productive systems.

Materials and Methods

Study area

The study area covers an area of 14031.98 ha in a wind production zone in the municipality of Reynosa, Tamaulipas, Mexico. There are 103 generators in the area with a production capacity of 321 MW.

Currently, land tenure is diversified into three private productive activities: wind energy generation, agriculture and livestock (grassland); however, there are still areas conserved with TT vegetation, where livestock has no access. The climate is classified as BS₁ (h') hx' (García, 2004) which corresponds to a warm semi-dry climate with average annual precipitation ranging between 500 and 700 mm and average annual temperature of 22 °C. The soil types are Castañozem, Vertisol and Xerosol, according to the Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI, 2017).

Landscape analysis

Land use was determined using QGIS Desktop (2022) version 3.26.3. The procedure proposed by Sader and Winne (1992), which uses the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), was used to visualize vegetation cover dynamics. NDVI enhances the greenness associated with vegetation by quantifying near red and infrared bands. This process allows the reduction of data volume, but keeps a semi-continuous variable correlated with vegetation biomass and green leaf area index. The Sentinel-2B satellite image dated January 6, 2022 was used for this study. Subsequently, NDVI was generated and geometric and atmospheric corrections were applied. The first, by georeferencing to the Coordinate Reference System WGS84 UTM zone 14 N and the second by using the Semi Automatic Classification Plugin. A supervised classification of the RGB-NDVI image (Red-Green-Blue band correction image) was performed for the identification of land uses. Data was corroborated by field visits, including visual inspections of plot contents in contrast with the software results (Vega-Vela et al., 2017). Also, a direct on-screen digitization was made of the roads and wind turbine areas that make up the wind farms. The product was a map in vector format, in which the area (ha) of each land use was estimated. Based on

la fauna (Bolívar-Cimé et al., 2016). Por lo tanto, además de conocer la composición y configuración del paisaje, es importante evaluar la comunidad vegetal que se distribuye en un sistema fragmentado, especialmente, para documentar cambios en la estructura vegetal mediante la identificación de especies sensibles a estos.

Los objetivos de la presente investigación fueron a) caracterizar y describir el grado de fragmentación en un parque eólico con actividades agropecuarias y, b) conocer su estructura y diversidad en los fragmentos con uso de vegetación del MET. Se espera que los elementos estudiados sirvan como indicadores para futuros estudios enfocados en la creación de corredores biológicos dentro de sistemas productivos.

Materiales y métodos

Área de estudio

El área de estudio comprende una superficie de 14031.98 ha en una zona de producción eólica en el municipio de Reynosa, Tamaulipas, México. En la zona se encuentran 103 generadores con una capacidad de producción de 321 MW.

Actualmente, la tenencia de la tierra se diversifica en tres actividades productivas de carácter privado: generación de energía eólica, agricultura y ganadería (pastizales); sin embargo, se mantienen áreas conservadas con vegetación de MET, donde el ganado no tiene acceso. El clima es del tipo BS₁ (h') hx' (García, 2004) que corresponde a semiseco cálido con una precipitación media anual que fluctúa entre los 500 y 700 mm y una temperatura media anual de 22 °C. Los tipos de suelo son Castañozem, Vertisol y Xerosol, de acuerdo con el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI, 2017).

Análisis del paisaje

Se determinaron los usos de suelo mediante el programa QGIS Desktop (2022) versión 3.26.3. Para la visualización de las dinámicas de cobertura vegetal se utilizó el procedimiento propuesto por Sader y Winne (1992), el cual utiliza el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI). El NDVI realiza el verdor asociado a la vegetación mediante la cuantificación de bandas rojo e infrarrojo cercanas. Dicho proceso permite la reducción del volumen de datos, pero mantiene una variable semicontinua correlacionada con la biomasa de la vegetación y el índice de área foliar verde. Para este estudio se utilizó la imagen del satélite Sentinel-2B con fecha del 6 de enero del 2022. Posteriormente, se generó el NDVI y se aplicaron correcciones geométricas y atmosféricas. La primera mediante la georreferenciación al Sistema de Referencia

this information, landscape metrics were calculated to quantify the spatial relationships between land uses. All fragments were grouped according to use category, an alphanumeric identification was assigned to each one and the information was rasterized to be entered into the FRAGSTATS version 4.2 program (McGarigal & Marks, 1995). Wind turbine land use was not included in this analysis as it was not detected in the rasterization process, due to its small percentage of surface area. One metric was calculated at the fragment level (Euclidean distance to nearest neighbor ENN_MN) and four at the class level (number of fragments NP, average fragment area AREA_MN, shape index SHAPE_MN and fractal dimension index FRAC_MN).

Vegetation analysis

In November 2021, the plant community in the elements identified as vegetation fragments of TT was analyzed. We established 30 sampling sites (Figure 1) divided into two strata (Mata-Balderas et al., 2020). The high stratum included shrub and tree vegetation with heights ≥ 2 m in rectangular plots of 75.0 m². The low stratum included herbaceous vegetation ranging from 0.30 to 1.99 m in height, within a 1 m². Species were identified using taxonomic keys and flora catalogs

de Coordenadas WGS84 UTM zona 14 N y la segunda mediante el complemento *Semi Automatic Classification Plugin*. Se realizó una clasificación supervisada de la imagen RGB-NDVI (imagen de corrección de la banda *Red-Green-Blue*) para la identificación de los usos del suelo. La información se corroboró mediante recorridos en campo, en los cuales se hicieron inspecciones visuales del contenido de las parcelas en contraste con los resultados del *software* (Vega-Vela et al., 2017). Asimismo, se hizo una digitalización directa en pantalla de los caminos y las áreas de aerogeneradores que conforman los parques eólicos. El producto fue un mapa en formato vectorial, en el cual se estimó la superficie (ha) de cada uso de suelo. Con esta información se procedió al cálculo de las métricas del paisaje con el fin de cuantificar las relaciones espaciales entre los usos de suelo. Se agruparon todos los fragmentos por categoría de uso, se asignó una identificación alfanumérica a cada una y se rasterizó la información para ser ingresada en el programa FRAGSTATS versión 4.2 (McGarigal & Marks, 1995). El uso de suelo de los aerogeneradores no se incluyó en este análisis al no ser detectada en el proceso de rasterización, por su porcentaje escaso de superficie. Se calculó una métrica a nivel de fragmento (distancia euclidiana al vecino más cercano ENN_MN) y cuatro a nivel de clase (número de fragmentos NP, área

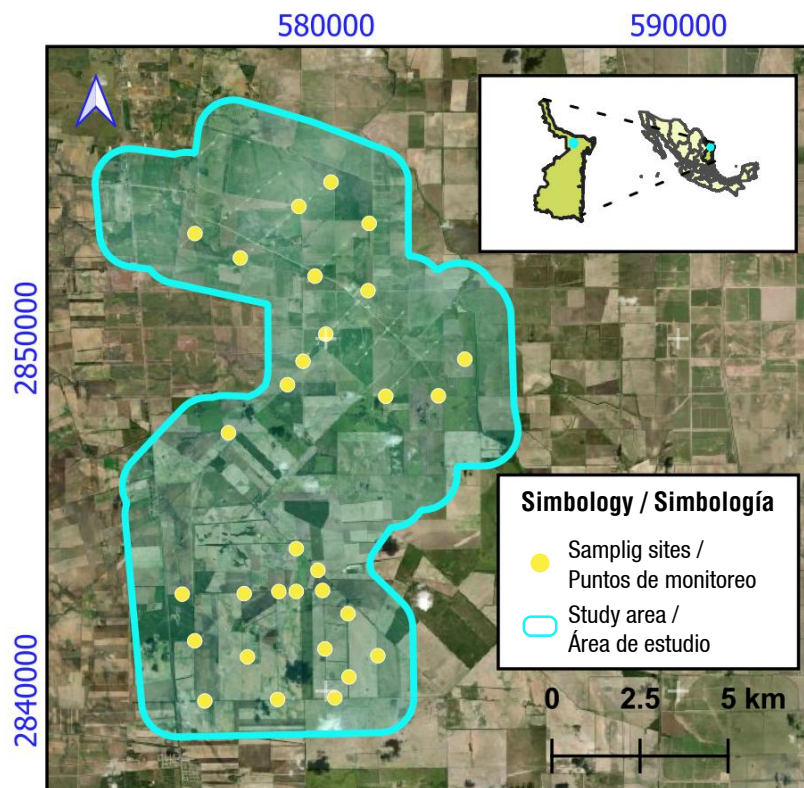


Figure 1. Vegetation sampling sites in fragments of Tamaulipan Thornscrub in a wind farm area in the municipality of Reynosa, Tamaulipas, Mexico. Source: Esri Map Services (2017).

Figura 1. Sitios de muestreo de la vegetación en fragmentos de Matorral Espinoso Tamaulipeco en una zona de parques eólicos del municipio de Reynosa, Tamaulipas, México. Fuente: Esri Map Services (2017).

of the area (Correll & Johnston, 1970; Molina-Guerra et al., 2019). Tree measurement variables of total height (h), crown diameter in north-south and east-west directions, and diameter at breast height ($D_{1.30}$) in woody species were measured, only basal diameter ($D_{0.10}$) was measured in low species (Alanís et al., 2020).

Data analysis

Abundance, cover and frequency were the floristic composition parameters determined. These were used in their relative form to determine the weighted value known as the Importance Value Index (IVI) (Magurran, 2004; Mueller-Dombois & Ellenberg, 1974). Vegetation alpha diversity was estimated using Shannon-Wiener's diversity index (H'), Margalef's richness index (D_{mg}) and Simpson's index (D). The first describes how diverse a specific habitat can be, taking into account the number of species present and their number of individuals. The second evaluates the biodiversity of a community, according to the numerical distribution of individuals of the species found. The last refers to dominance, considering whether a community is determined by species with a high abundance value (Cadena-Zamudio et al., 2022; Magurran, 2004; Manzanilla et al., 2020). Beta diversity was evaluated by means of a similarity dendrogram based on species abundance, using the Bray-Curtis ordination model (Whittaker, 1960), generated in the PAST version 4.13 statistical program (Hammer et al., 2001).

Results

Landscape analysis

The multipurpose productive system comprising the study area has five land uses (Figure 2). Agriculture and grassland activities (for livestock) cover the largest area with 53.53 % and 25.31 %, respectively, followed by TT vegetation areas (20.63 %), roads (0.51 %) and wind turbines (0.01 %).

Regarding landscape metrics calculation, agricultural use had the largest area fragments (3720.49 ha), followed by grasslands (582.22 ha), TT vegetation areas (429.92 ha) and finally roads (5.06 ha). According to Table 1, for ENN_MN, vegetation fragments had the highest aggregation because they yielded the lowest value (173 m), followed by agriculture fragments (180 m), roads (250 m) and grasslands (462 m). Grasslands similarly had the highest spatial complexity by presenting the value furthest from '1' in the SHAPE_MN metric, contrary to roads which had the closest value. FRAC_MN values vary from 1.04 to 1.08, so, based on their area and perimeter, there is no considerable variation in the degree of complexity between classes. Regarding NP, roads (146) and vegetation fragments (100) showed the highest values, contrary to agricultural (42) and grassland (25)

promedio del fragmento AREA_MN, índice de forma SHAPE_MN e índice de dimensión fractal FRAC_MN).

Análisis de la vegetación

En noviembre del 2021 se analizó la comunidad vegetal en los elementos identificados como fragmentos de vegetación del MET. Se establecieron 30 sitios de muestreo (Figura 1) divididos en dos estratos (Mata-Balderas et al., 2020). El estrato alto abarcó la vegetación de porte arbustivo y arbóreo con alturas ≥ 2 m en parcelas rectangulares de 75.0 m². El estrato bajo incluyó la vegetación herbácea que se encontrara en un rango de 0.30 a 1.99 m de altura, dentro de un cuadro de 1 m². Las especies se identificaron usando claves taxonómicas y catálogos de flora de la zona (Correll & Johnston, 1970; Molina-Guerra et al., 2019). Se midieron las variables dasométricas de altura total (h) y diámetro de copa en sentidos norte-sur y este-oeste, diámetro a la altura del pecho ($D_{1.30}$) en especies leñosas y diámetro basal ($D_{0.10}$) en especies de porte bajo (Alanís et al., 2020).

Análisis de la información

Los parámetros de composición florística determinados fueron abundancia, cobertura y frecuencia. Estos se utilizaron en su forma relativa para obtener el valor ponderado denominado Índice de Valor de Importancia (IVI) (Magurran, 2004; Mueller-Dombois & Ellenberg, 1974). La diversidad alfa de la vegetación se estimó mediante los índices de diversidad de Shannon-Wiener (H'), índice de riqueza de Margalef (D_{mg}) e índice de Simpson (D). El primero describe lo diverso que puede ser un hábitat específico, tomando en cuenta el número de especies presentes y su número de individuos. El segundo evalúa la biodiversidad de una comunidad, de acuerdo con la distribución numérica de los individuos de las especies encontradas. El último hace referencia a la dominancia, al considerar si una comunidad está determinada por especies con alto valor de abundancia (Cadena-Zamudio et al., 2022; Magurran, 2004; Manzanilla et al., 2020). La diversidad beta se evaluó a través de un dendrograma de similitud basado en la abundancia de las especies, mediante el modelo de ordenación de Bray-Curtis (Whittaker, 1960), generado en el programa estadístico PAST versión 4.13 (Hammer et al., 2001).

Resultados

Análisis del paisaje

En el sistema productivo multipropósito que conforma el área de estudio se encontraron cinco usos de suelo (Figura 2). Las actividades de agricultura y pastizal (para ganadería) abarcan la mayor superficie con 53.53 % y 25.31 %, respectivamente, seguidas de las áreas de vegetación del MET (20.63 %), caminos (0.51 %) y aerogeneradores (0.01 %).

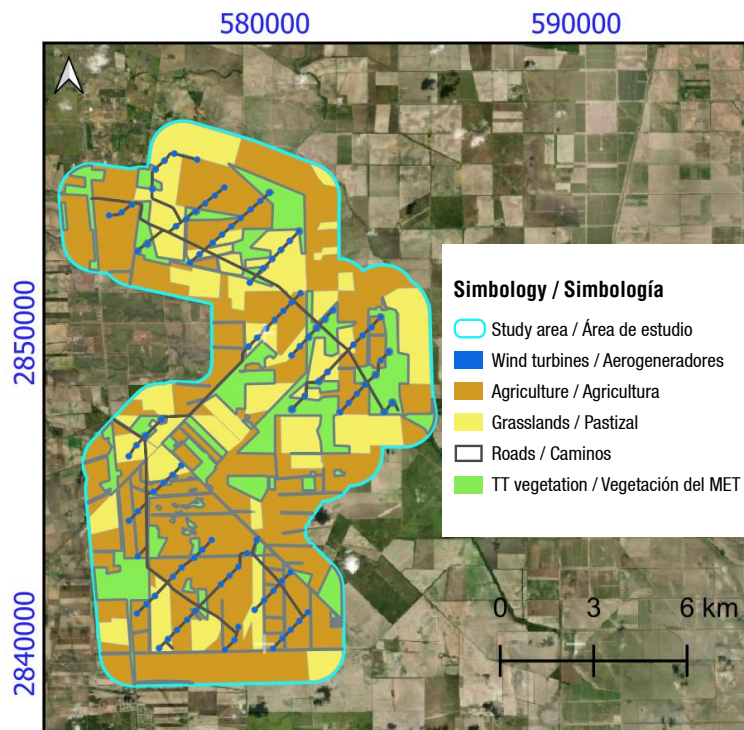


Figure 2. Land uses in a wind farm area in the municipality of Reynosa, Tamaulipas, Mexico. TT: Tamaulipan Thornscrub. **Figura 2.** Usos de suelo en una zona de parques eólicos en el municipio de Reynosa, Tamaulipas, México. MET: Matorral espinoso tamaulipeco.

Table 1. Land use and landscape metrics at class level in a wind farm area in the municipality of Reynosa, Tamaulipas, Mexico. **Cuadro 1.** Usos de suelo y métricas del paisaje a nivel clase en una zona de parques eólicos en el municipio de Reynosa, Tamaulipas, México.

Land use/ Uso de suelo	Area (ha)/ Área (ha)	Number of fragments/ Número de fragmentos	AREA_MN (ha)	ENN_MN (m)	SHAPE_MN	FRAC_MN
TT vegetation/ Vegetación del MET	2894.25	100	1.66	173	1.66	1.08
Grassland/Pastizal	3552.13	25	141.89	462	1.70	1.07
Agriculture/Agricultura	7513.17	42	179.41	180	1.55	1.04
Roads/Caminos	71.42	146	1.25	250	1.25	1.04

AREA_MN: average fragment area; ENN_MN: Euclidean distance to nearest neighbor; SHAPE_MN: shape index; FRAC_MN: fractal dimension index. TT: Tamaulipan Thornscrub.

AREA_MN: área promedio del fragmento; ENN_MN: distancia euclidiana al vecino más cercano; SHAPE_MN: índice de forma; FRAC_MN: índice de dimensión fractal. MET: Matorral Espinoso Tamaulipeco.

Vegetation analysis

Table 2 shows the 47 species recorded, corresponding to 23 families, regarding the composition of the TT vegetation cover. Fabaceae, Poaceae and Cactaceae showed the highest presence, with eight, six and five species, respectively. In the upper stratum, *Celtis pallida* Torr. (granjeno), *Neltuma glandulosa* Torr. (mezquite dulce), *Forestiera angustifolia* Torr. (panalero)

En cuanto al cálculo de las métricas del paisaje, el uso agrícola presentó los fragmentos con mayor superficie (3720.49 ha), seguido de los pastizales (582.22 ha), áreas de vegetación del MET (429.92 ha) y finalmente los caminos (5.06 ha). De acuerdo con el Cuadro 1, para la ENN_MN, los fragmentos de vegetación tuvieron mayor agregación debido a que arrojaron el valor más bajo (173 m); le siguen los fragmentos de agricultura (180 m), caminos (250 m) y pastizales

Table 2. Values of absolute abundance, canopy cover, average height and importance value index (IVI) of the Tamaulipan Thornscrub vegetation cover in a wind farm area in the municipality of Reynosa, Tamaulipas, Mexico.

Cuadro 2. Valores de abundancia absoluta, cobertura de copa, altura promedio e índice de valor de importancia (IVI) de la cubierta vegetal del Matorral Espinoso Tamaulipeco en una zona de parques eólicos en el municipio de Reynosa, Tamaulipas, México.

Family/ Familia	Scientific name/ Nombre científico	Abundance (individuals·ha ⁻¹)/ Abundancia (individuos·ha ⁻¹)	Cover (m ² ·ha ⁻¹)/ Cobertura (m ² ·ha ⁻¹)	Average height (m)/ Altura promedio (m)	IVI (%)
Ulmaceae	<i>Celtis pallida</i> Torr.	1351	7.95	2.61	33.04
Fabaceae	<i>Neltuma glandulosa</i> (Torr.) Britton & Rose	613	18.29	4.31	27.21
Oleaceae	<i>Forestiera</i> <i>angustifolia</i> Torr.	613	7.25	1.98	19.68
Fabaceae	<i>Ebenopsis ebano</i> (Berland.) Barneby & J. W. Grimes	324	16.17	4.43	17.93
Rhamnaceae	<i>Karwinskia</i> <i>humboldtiana</i> (Willd. ex Schult.) Zucc.	387	4.16	1.23	14.24
Zygophyllaceae	<i>Guaiacum</i> <i>angustifolium</i> (Engelm.) A. Gray	364	3.59	0.95	11.79
Boraginaceae	<i>Cordia boissieri</i> A. DC.	178	9.06	2.53	10.75
Fabaceae	<i>Coursetia axillaris</i> J. M. Coult. & Rose	378	4.65	1.93	9.85
Fabaceae	<i>Havardia pallens</i> (Benth.) Britton & Rose	191	8.23	2.51	9.83
Cactaceae	<i>Opuntia engelmannii</i> Salm-Dyck ex Engelm.	93	10.59	1.27	9.45
Fabaceae	<i>Senegalia greggii</i> (A. Gray) Britton & Rose	18	16.44	3.80	8.34
Cactaceae	<i>Leptocereus</i> <i>quadricostatus</i> (Bello) Britton & Rose	89	11.78	2.17	8.05
Fabaceae	<i>Vachellia farnesiana</i> (L.) Wight & Arn.	67	8.33	2.10	8.05
Rutaceae	<i>Zanthoxylum</i> <i>fagara</i> (L.) Sarg.	160	5.49	1.57	7.78
Fabaceae	<i>Senegalia berlandieri</i> (Benth.) Britton & Rose	191	6.87	2.41	7.73
Fabaceae	<i>Vachellia rigidula</i> (Benth.) Seigler & Ebinger	156	4.60	1.62	7.31
Rubiaceae	<i>Randia aculeata</i> L.	129	3.46	0.99	7.16
Rosaceae	<i>Prunus serotina</i> Ehrh.	320	3.44	0.75	6.97
Fabaceae	<i>Cercidium macrum</i> I. M. Johnst.	13	13.33	2.73	6.89
Ebenaceae	<i>Diospyros texana</i> Scheele	98	6.61	1.78	6.62

Table 2. Values of absolute abundance, canopy cover, average height and importance value index (IVI) of the Tamaulipan Thornscrub vegetation cover in a wind farm area in the municipality of Reynosa, Tamaulipas, Mexico. (cont.)

Cuadro 2. Valores de abundancia absoluta, cobertura de copa, altura promedio e índice de valor de importancia (IVI) de la cubierta vegetal del Matorral Espinoso Tamaulipeco en una zona de parques eólicos en el municipio de Reynosa, Tamaulipas, México. (cont.)

Family/ Familia	Scientific name/ Nombre científico	Abundance (individuals·ha ⁻¹)/ Abundancia (individuos·ha ⁻¹)	Cover (m ² ·ha ⁻¹)/ Cobertura (m ² ·ha ⁻¹)	Average height (m)/ Altura promedio (m)	IVI (%)
Asparagaceae	<i>Yucca treculeana</i> Carrière.	71	4.61	1.28	6.08
Sapotaceae	<i>Sideroxylon</i> <i>celastrinum</i> (Kunth) T. D. Penn	138	4.87	1.77	6.06
Verbenaceae	<i>Lantana camara</i> L.	151	3.03	1.00	5.43
Solanaceae	<i>Lycium berlandieri</i> Dunal.	89	4.24	1.28	5.43
Rhamnaceae	<i>Condalia hookeri</i> M. C. Johnst.	36	7.78	2.25	4.74
Solanaceae	<i>Capsicum annuum</i> L.	76	3.66	1.17	4.60
Cactaceae	<i>Cylindropuntia</i> <i>leptocaulis</i> (DC.) F. M. Knuth	58	4.27	1.23	4.24
Malvaceae	<i>Abutilon fruticosum</i> Guill. & Perr.	151	2.78	0.73	4.20
Euphorbiaceae	<i>Croton cortesianus</i> Kunth.	58	3.62	0.93	3.96
Simaroubaceae	<i>Castela texana</i> (Torr. & A. Gray) Rose	40	4.2	1.42	3.58
Fabaceae	<i>Erythrostemon</i> <i>mexicanus</i> (A. Gray.) Gagnon & G. P. Lewis	31	3.62	1.54	3.19
Scrophulariaceae	<i>Leucophyllum</i> <i>frutescens</i> (Berland.) I. M. Johnst.	27	3.78	0.95	2.82
Euphorbiaceae	<i>Jatropha dioica</i> Sessé	93	0.56	0.74	1.99
Asteraceae	<i>Gymnosperma</i> <i>glutinosum</i> (Spreng.) Less.	31	0.89	0.29	1.97
Cactaceae	<i>Thelocactus setispinus</i> (Engelm.) E. F. Anderson	9	0.44	0.15	1.07
Verbenaceae	<i>Aloysia macrostachya</i> (Torr.) Moldenke	9	1.11	0.30	1.00
Cactaceae	<i>Echinocereus</i> <i>enneacanthus</i> Engelm.	27	0.44	0.20	0.96
Poaceae	<i>Cenchrus ciliaris</i> L.	47 000	109.93	0.40	114.77
Poaceae	<i>Sorghum halepense</i> (L.) Pers.	26 667	95.42	0.45	76.04
Asteraceae	<i>Parthenium</i> <i>hysterophorus</i> L.	3 667	85.76	0.28	27.64
Asteraceae	<i>Helianthus annuus</i> L.	1 667	90.00	0.90	20.48
Petiveriaceae	<i>Rivina humilis</i> L.	1 667	66.67	0.25	14.78

Table 2. Values of absolute abundance, canopy cover, average height and importance value index (IVI) of the Tamaulipan Thornscrub vegetation cover in a wind farm area in the municipality of Reynosa, Tamaulipas, Mexico. (cont.)

Cuadro 2. Valores de abundancia absoluta, cobertura de copa, altura promedio e índice de valor de importancia (IVI) de la cubierta vegetal del Matorral Espinoso Tamaulipeco en una zona de parques eólicos en el municipio de Reynosa, Tamaulipas, México. (cont.)

Family/ Familia	Scientific name/ Nombre científico	Abundance (individuals·ha ⁻¹)/ Abundancia (individuos·ha ⁻¹)	Cover (m ² ·ha ⁻¹)/ Cobertura (m ² ·ha ⁻¹)	Average height (m)/ Altura promedio (m)	IVI (%)
Boraginaceae	<i>Heliotropium angiospermum</i> Murray	2 000	34.44	0.15	13.54
Poaceae	<i>Chloris virgata</i> P. Durand	333	40.00	0.20	8.84
Poaceae	<i>Bouteloua trifida</i> Thurb. ex S. Watson	2 333	23.33	0.05	8.39
Poaceae	<i>Cynodon dactylon</i> (L.) Pers.	667	33.33	0.20	8.12
Poaceae	<i>Melinis repens</i> (Willd.)	1 000	26.67	0.25	7.41

and *Ebenopsis ebano* (Berland.) Barneby & J. W. Grimes (ebano) had higher abundance, cover and average height. Together, these provided 97.86 % of the 300 % of importance. In the lower stratum, the species of greatest importance were *Cenchrus ciliaris* L. (zacate buffel; 114.77 %) and *Sorghum halepense* (L.) Pers. (African canary grass; 76.04 %). Absolute abundance for the high stratum is 6 824 individuals·ha⁻¹ with a total canopy cover of 224.19 m²·ha⁻¹ and average height of 1.64 m. In the low stratum, the values of these parameters are at 87 000 individuals·ha⁻¹, 606 m²·ha⁻¹ and 0.31 m, respectively.

Alpha diversity yielded a value of 3.18 for Shannon's index, 0.93 for Simpson's index and 6.13 for Margalef's index. Figure 3 shows the dendrogram derived from the beta diversity analysis, which indicates that the sampling sites show average similarity based on plant species abundance. Of the 30 sites evaluated, 15 are grouped above 50 %, but only two are grouped in the highest percentage of similarity with 62 %.

Discussion

According to the land use classification, the system in the study area can be classified as agroforestry, particularly as agropastoral, since it combines the presence of woody species with agricultural and livestock practices (Cabrera et al., 2011); however, by including wind farm activities, it has been called a multipurpose system. In this system, the native vegetation of TT is composed of a greater number of smaller, complex and poorly segregated fragments, in contrast to the agricultural and grassland uses that have a less number of fragments but are larger in size.

(462 m). De manera similar, los pastizales tuvieron la mayor complejidad espacial al presentar el valor más alejado del '1' en la métrica de SHAPE_MN, contrario a los caminos que presentan el valor más cercano. Los valores de FRAC_MN varían entre 1.04 a 1.08, por lo que, basados en su área y perímetro, no se aprecia una variación considerable del grado de complejidad entre clases. Referente al NP, los caminos (146) y los fragmentos de vegetación (100) mostraron los valores más altos, contrario a los agrícolas (42) y pastizal (25).

Análisis de la vegetación

Con respecto a la composición de la cubierta vegetal del MET, el Cuadro 2 presenta las 47 especies registradas, correspondientes a 23 familias. Fabaceae, Poaceae y Cactaceae tuvieron la mayor presencia, con ocho, seis y cinco especies, respectivamente. En el estrato alto, *Celtis pallida* Torr. (granjeno), *Neltuma glandulosa* Torr. (mezquite dulce), *Forestiera angustifolia* Torr. (panalero) y *Ebenopsis ebano* (Berland.) Barneby & J. W. Grimes (ébano) tuvieron la mayor abundancia, cobertura y altura promedio. En conjunto, estas aportan 97.86 % del 300 % de importancia. En el estrato bajo, las especies de mayor importancia fueron *Cenchrus ciliaris* L. (zacate buffel; 114.77 %) y *Sorghum halepense* (L.) Pers. (alpiste africano; 76.04 %). La abundancia absoluta para el estrato alto es de 6 824 individuos·ha⁻¹ con una cobertura total de copa de 224.19 m²·ha⁻¹ y altura promedio de 1.64 m. En el estrato bajo, los valores de estos parámetros se encuentran en 87 000 individuos·ha⁻¹, 606 m²·ha⁻¹ y 0.31 m, respectivamente.

La diversidad alfa arrojó un valor de 3.18 para el índice de Shannon, 0.93 para el índice de Simpson y

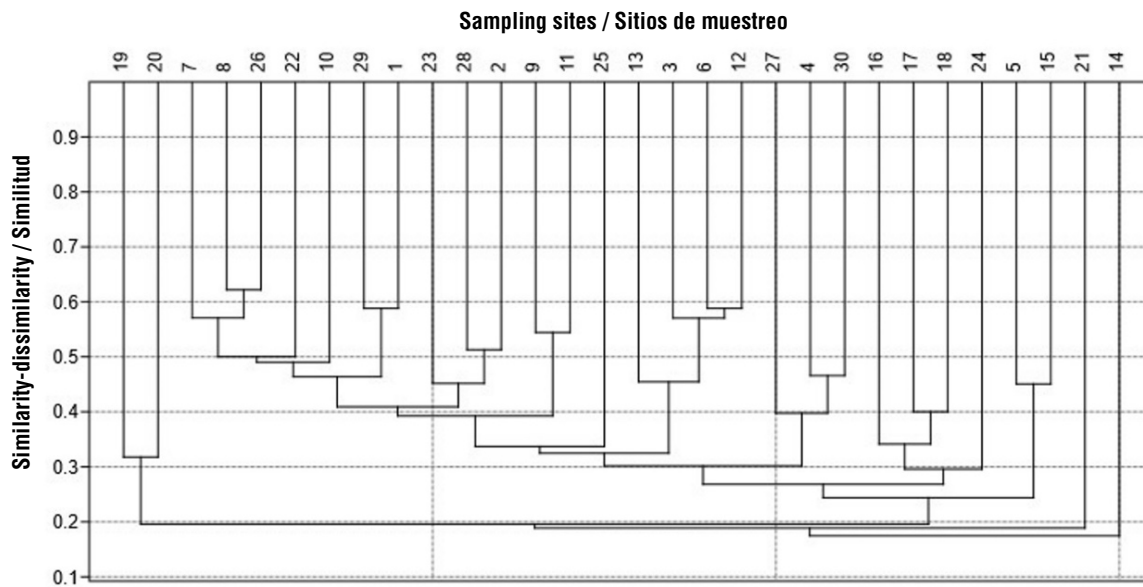


Figure 3. Similarity-dissimilarity dendrogram (Bray-Curtis) resulting from the analysis of beta diversity among the sampling sites of the Tamaulipan Thornscrub vegetation cover, based on species abundance, in a wind farm area.

Figura 3. Dendrograma de similitud-disimilitud (Bray-Curtis) obtenido del análisis de diversidad beta entre los sitios de muestreo de la cubierta vegetal del Matorral Espinoso Tamaulipeco, con base en la abundancia de especies, en una zona de parques eólicos.

Mateucci and Silva (2005) affirm that less anthropic territories present more complex forms and vice versa. In the present study, agricultural and grassland uses dominate the landscape due to their larger surface area. However, the proximity between vegetation fragments could facilitate the creation of biological corridors with focal species within the ecosystem (Alonso-F et al., 2017), which would require studies to establish.

Regarding the floristic evaluation of the vegetation fragments, the families with the highest number of species were Fabaceae, Poaceae and Cactaceae. Several studies in the region have reported the Fabaceae family as the most representative in several land uses (Alanís-Rodríguez et al., 2021; Jiménez Pérez et al., 2013; Pequeño Ledezma et al., 2021). This is due to its ability to fix nitrogen and withstand the conditions typical of arid zones (Reyna-González et al., 2021). On the other hand, the Poaceae family groups fast-growing non-native species, used for agropastoral activities in the surroundings of the conserved areas (Jiménez Pérez et al., 2013). Meanwhile, the high presence of the Cactaceae family confirms its affinity for arid areas (Mata Balderas et al., 2015). These results coincide with those found by Vargas-Vázquez et al. (2022) in the municipality of Reynosa and with Foroughbakhch et al. (2013) in areas of Tamaulipas, which show a good conservation of these families in the region.

Of the Fabaceae family, *N. glandulosa* had the highest mean cover and height values and the second place

6.13 para el índice de Margalef. La Figura 3 muestra el dendrograma obtenido con el análisis de diversidad beta, el cual indica que los sitios de muestreo presentan similitud media con base en la abundancia de especies vegetales. De los 30 sitios evaluados, 15 se agrupan por arriba del 50 %, pero solamente dos se agrupan en el mayor porcentaje de similitud con 62 %.

Discusión

De acuerdo con la clasificación de usos del suelo, el sistema que presenta el área de estudio se puede clasificar como agroforestal, particularmente como agropastoral, al combinar la presencia de especies leñosas con prácticas agrícolas y ganaderas (Cabrera et al., 2011); sin embargo, al incluir las actividades del parque eólico, se le ha denominado un sistema multipropósito. En este sistema, la vegetación nativa del MET se compone de una mayor cantidad de fragmentos de menor superficie, complejos y poco segregados, contrario a los usos agrícolas y pastizales que tienen menor cantidad de fragmentos, pero de mayor tamaño. Mateucci y Silva (2005) sostienen que los territorios menos antrópicos presentan formas más complejas y viceversa. En el presente estudio, los usos agrícolas y pastizales dominan en el paisaje por su mayor superficie. No obstante, la cercanía entre los fragmentos de vegetación podría facilitar la creación de corredores biológicos con especies focales dentro del ecosistema (Alonso-F et al., 2017), lo cual requeriría de estudios para su establecimiento.

in abundance. Similarly, the cover of *N. glandulosa* ($17.88 \text{ m}^2 \cdot \text{ha}^{-1}$) was higher compared to that of *E. ebano* ($4.79 \text{ m}^2 \cdot \text{ha}^{-1}$) in a plantation in the municipality of Rio Bravo (García-Mosqueda et al., 2014) contiguous to that of the present project. In the study by Foroughbakhch et al. (2013), *N. glandulosa* was the most important in recovery sites in Tamaulipas. This confirms that the conditions recorded in and around the study area are suitable for the establishment of this species.

The four species with the highest IVI (*C. pallida*, *N. glandulosa*, *F. angustifolia* and *E. ebano*) have been reported in diverse land uses, both in disturbed areas that are in the process of regeneration (Alanís-Rodríguez et al., 2021) and in areas with deep soils, rich in nutrients and moisture (Pequeño-Ledezma et al., 2017). In the present assessment, these species account for almost a third of the total importance for the upper stratum.

Regarding the absolute abundance for all vegetation ($6828 \text{ individuals} \cdot \text{ha}^{-1}$), the amount is above that reported by Mora et al. (2013b) in reference to regeneration and livestock areas. But is similar to the $6310 \pm 523 \text{ individuals} \cdot \text{ha}^{-1}$, recorded by Jiménez Pérez et al. (2013) in a regenerated clear cutting area. The specific richness for the shrubby tree stratum (37) is higher than that reported in other TT areas of between 10 and 28 years of regeneration (Jiménez et al., 2012; Mora et al., 2013a; Reyna-González et al., 2021); however, it is lower than the 55 recorded (mostly shrubby) by Vargas-Vázquez et al. (2022). The diversity (H') and richness (D_{mg}) indices yield higher values than pristine TT (Valdez et al., 2018), regenerating (Patiño-Flores et al., 2022), post-fire (Graciano-Ávila et al., 2018) and agroforestry (Alanís-Rodríguez et al., 2018; Sarmiento-Muñoz et al., 2019) ecosystems. Similarly, Simpson's index supports high diversity by yielding a value close to 1 (Valdez et al., 2018).

The results of the Bray-Curtis model show the variability of species abundance in the area. The multiple groupings may be a product of taxa adapting to the characteristics of the evaluation sites (Silva-García et al., 2022). Examples of this are the genera *Jatropha*, *Croton*, *Opuntia* and *Cylindropuntia* which tend to be found mostly on slopes or steep slopes (Foroughbakhch et al., 2013; Reyna-González et al., 2021).

Conclusions

The wind farm area has a set of anthropogenic activities dominated by agriculture and livestock, which is why it has been called a multipurpose system. These activities form fragments of Tamaulipan Thornscrub vegetation that are scarcely modified based on their characteristics. The richness and diversity of

En cuanto a la evaluación florística de los fragmentos de vegetación, las familias con el mayor número de especies fueron Fabaceae, Poaceae y Cactaceae. Diversos estudios de la región han reportado a la familia Fabaceae como la más representativa en varios usos del suelo (Alanís-Rodríguez et al., 2021; Jiménez Pérez et al., 2013; Pequeño Ledezma et al., 2021). Esto se debe a su capacidad de fijación de nitrógeno y de soportar las condiciones propias de las zonas áridas (Reyna-González et al., 2021). Por otro lado, la familia Poaceae agrupa especies no nativas de crecimiento rápido, utilizadas para las actividades agropastoriles en los alrededores de las áreas conservadas (Jiménez Pérez et al., 2013). Por su parte, la presencia alta de la familia Cactaceae confirma su afinidad por las zonas áridas (Mata Balderas et al., 2015). Estos resultados coinciden con los obtenidos por Vargas-Vázquez et al. (2022) en el municipio de Reynosa y con Foroughbakhch et al. (2013) en zonas de Tamaulipas, los cuales muestran una buena conservación de estas familias en la región.

De la familia Fabaceae, *N. glandulosa* tuvo los valores más altos de cobertura y altura promedio y el segundo lugar en abundancia. De manera similar, la cobertura de *N. glandulosa* ($17.88 \text{ m}^2 \cdot \text{ha}^{-1}$) fue mayor que la de *E. ebano* ($4.79 \text{ m}^2 \cdot \text{ha}^{-1}$) en una plantación del municipio de río Bravo (García-Mosqueda et al., 2014) contiguo al del presente proyecto. En el estudio de Foroughbakhch et al. (2013), *N. glandulosa* fue la de mayor importancia en sitios de recuperación de Tamaulipas. Esto constata que las condiciones registradas en el área de estudio y alrededores son propicias para el establecimiento de dicha especie.

Las cuatro especies con mayor IVI (*C. pallida*, *N. glandulosa*, *F. angustifolia* y *E. ebano*) se han reportado en diversos usos de suelo, tanto en áreas perturbadas que se encuentran en proceso de regeneración (Alanís-Rodríguez et al., 2021) como en áreas con suelos profundos, ricos en nutrientes y humedad (Pequeño-Ledezma et al., 2017). En la presente evaluación, estas especies suman casi una tercera parte de la importancia total para el estrato alto.

Respecto a la abundancia absoluta para toda la vegetación ($6828 \text{ individuos} \cdot \text{ha}^{-1}$), la cantidad se encuentra por encima de la señalada por Mora et al. (2013b) en áreas de referencia, regeneración y ganadería, pero es similar a los $6310 \pm 523 \text{ individuos} \cdot \text{ha}^{-1}$ que registran Jiménez Pérez et al. (2013) en un área de matarrasa regenerada. La riqueza específica para el estrato arbóreo arbustivo (37) es superior a la reportada en otras áreas del MET de entre 10 y 28 años de regeneración (Jiménez et al., 2012; Mora et al., 2013a; Reyna-González et al., 2021); sin embargo, es menor que las 55 registradas (la mayoría de porte arbustivo) por Vargas-Vázquez et al. (2022). Los

this flora presents higher values compared to other ecosystems with better conservation conditions. Thus, characterizing vegetation in this system will allow us to formulate management actions to improve wildlife connectivity within the biological corridors.

End of English version

References

- Alanís-Rodríguez, E., Valdecantos-Dema, A., Canizales-Velázquez, P. A., Chávez-Costa, A., Rubio-Camacho, E., & Mora Olivo, A. (2018). Análisis estructural de un área agroforestal en una proporción del matorral xerófilo del noreste de México. *Acta Botanica*, 125, 133–156. <https://doi.org/10.21829/abm125.2018.1329>
- Alanís, E., Mora, A., & Marroquín, J. S. (2020). *Muestreo ecológico de la vegetación*. Editorial Universitaria UANL. https://www.researchgate.net/publication/343137042_Muestreo_Ecologico_de_la_vegetacion
- Alanís-Rodríguez, E., Molina-Guerra, V., Collantes-Chávez-Costa, A., Buendía-Rodríguez, E., Mora-Olivo, A., Sánchez-Castillo, L., & Alcalá-Rojas, A. G. (2021). Structure, composition and carbon stocks of woody plant community in assisted and unassisted ecological succession in a Tamaulipan thornscrub, Mexico. *Revista Chilena de Historia Natural*, 94(1), 1–12. <https://doi.org/10.1186/s40693-021-00102-6>
- Alonso-F, A. M., Finegan, B., & Brenes, C. (2017). Evaluación de la conectividad estructural y funcional en el corredor de conservación Podocarpus-Yacuambi, Ecuador. *Caldasia*, 39(1), 140–156. <https://doi.org/10.15446/caldasia.v39n1.64324>
- Altamirano, A., Miranda, M., & Jiménez, C. (2012). Incertidumbre de los índices de paisaje en el análisis de la estructura espacial. *BOSQUE*, 33(2), 171–181. <https://doi.org/10.4067/S0717-92002012000200007>
- Azamar Alonso, A., & García Beltrán, Y. M. (2021). Diagnosis and risks of the wind energy in Mexico. *Revista de Geografía Agrícola*, (67), 27–45. <https://doi.org/10.5154/r.rga.2021.67.02>
- Bolívar-Cimé, B. B., Bolívar-Cimé, A., Cabrera-Cruz, S. A., Muñoz-Jiménez, O., & Villegas-Patraca, R. (2016). Bats in a tropical wind farm: species composition and importance of the spatial attributes of vegetation cover on bat fatalities. *Journal of Mammalogy*, 97(4), 1197–1208. <https://doi.org/10.1093/jmammal/gyw069>
- Cabrera, D. L., Díaz, E. R. A., Berny, J. C., & Lozano, M. G. (2011). *Establecimiento de sistemas agroforestales*. https://www.conafor.gob.mx/biblioteca/documentos/MANUAL_SISTEMAS_AGROFORESTALES.PDF
- Cadena-Zamudio, D. A., Flores-Garnica, J. G., Lomelí-Zavala, M. E., & Flores-Rodríguez, A. G. (2022). Does the severity of a forest fire modify the composition, diversity and structure of temperate forests in Jalisco? *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 28(1), 3–20. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2020.12.076>
- Correll, D. S., & Johnston, M. C. (1970). *Manual of vascular plants of Texas*. Texas Research Institute Foundation.

índices de diversidad (H') y riqueza (D_{mg}) arrojan valores superiores a ecosistemas prístinos del MET (Valdez et al., 2018), en regeneración (Patiño-Flores et al., 2022), posincendio (Graciano-Ávila et al., 2018) y agroforestal (Alanís-Rodríguez et al., 2018; Sarmiento-Muñoz et al., 2019). De la misma manera, el índice de Simpson sustenta una diversidad alta al arrojar un valor cercano al 1 (Valdez et al., 2018).

Los resultados del modelo de Bray-Curtis muestran la variabilidad de abundancia de las especies en el área. Las múltiples agrupaciones pueden ser producto de la adaptación de los taxones a las características de los sitios de evaluación (Silva-García et al., 2022). Ejemplo de esto son los géneros *Jatropha*, *Croton*, *Opuntia* y *Cylindropuntia* que suelen encontrarse mayormente en laderas o pendientes pronunciadas (Foroughbakhch et al., 2013; Reyna-González et al., 2021).

Conclusiones

La zona de parques eólicos presenta un conjunto de actividades antropogénicas donde dominan la agricultura y ganadería, por lo que se ha denominado sistema multipropósito. Dichas actividades forman fragmentos de vegetación del Matorral Espinoso Tamaulipeco poco modificados con base en su configuración. La riqueza y diversidad de esta flora presenta valores más altos comparados con otros ecosistemas en mejor estado de conservación. De esta manera, la caracterización de la vegetación en este sistema permitirá formular acciones de manejo para mejorar la conectividad de la vida silvestre dentro de los corredores biológicos.

Fin de la versión en español

- Ecological Society of America (ESA). (2019). *Impacts to wildlife of wind energy siting and operation in the United States*. <https://southcentralclimate.org/wp-content/uploads/2020/02/2019-Wind-turbines-and-wildlife-Issues-in-Ecol.pdf>
- Esri Map Service. (2017). *World Imagery*. Arcgis. <https://www.arcgis.com/home/item.html?id=974d45be315c4c87b2ac32be59af9a0b>
- Foroughbakhch, R., Alvarado-Vázquez, M. A., Carrillo A., Hernández-Piñero, J. L., & Guzmán, M. A. (2013). Diversidad florística de un área dominada por arbustos en el Noreste de México. *Phyton*, 82(2), 175–184. https://www.researchgate.net/publication/317537073_Diversidad_floristica_de_un_area_dominada_por_arbustos_en_el_Noreste_de_Mexico
- Foroughbakhch, R., Hernández-Piñero, J. L., Alvarado-Vázquez, M. A., Carrillo-Parra, A., Macías, C. V., & Estrada, A. R. (2011). Native plants of Northeastern Mexico: Their potential in the restoration of damaged ecosystems. In L. Marín & D. Kovač (Eds.), *Native species: Identification, conservation and restoration* (1st ed., vol. 1, pp. 85–115). Nova Science Publishers. <https://www>

researchgate.net/publication/236855592_Native_plants_of_northeastern_Mexico_Their_potential_in_the_restoration_of_damaged_ecosystems

- García, E. (2004). *Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen (Para adaptarlo a las condiciones de la República Mexicana)* (5.ª ed.). Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México. <http://www.publicaciones.igg.unam.mx/index.php/ig/catalog/book/83>
- García-Mosqueda, G. E., Jiménez-Pérez, J., Aguirre-Calderón, O. A., González-Rodríguez, H., Carrillo-Parra, A., Espinosa-Ramírez, M., & García-García, D. A. (2014). Biomasa de dos especies de matorral en tres densidades de plantación en Tamaulipas, México. *Revista Latinoamericana de Recursos Naturales*, 10(2), 52–59. <https://revista.itson.edu.mx/index.php/rlrn/article/view/232>
- González-Rodríguez, H., Himmelsbach, W., Sarquís-Ramírez, J. I., Cantú-Silva, I., Ramírez-Lozano, R., & López-Hernández, J. M. (2016). Seasonal water relations in four co-existing native shrub species from Northeastern Mexico. *Arid Land Research and Management*, 30(4), 375–388. <https://doi.org/10.1080/15324982.2015.1133726>
- Graciano-Ávila, G., Alanís-Rodríguez, E., Aguirre-Calderón, Ó. A., Rubio-Camacho, E. A., & González-Tagle, M. A. (2018). Estructura y diversidad post-incendio en una zona de matorral espinoso tamaulipeco. *Polibotanica*, 45(23), 89–100. <https://doi.org/10.18387/polibotanica.45.7>
- Hammer, Ø., Harper, D. A. T., & Ryan, P. D. (2001). PAST: Paleontological statistics software package for education and data analysis. *Paleontología Electrónica*, 4(1), 1–9. https://palaeo-electronica.org/2001_1/past/past.pdf
- Hernández-Pérez, E., García-Franco, J. G., Vázquez, G., & Cantellano, E. (2022). Cambio de uso de suelo y fragmentación del paisaje en el centro de Veracruz, México (1989-2015). *Madera y Bosques*, 28(1), e2812294. <https://doi.org/10.21829/myb.2022.2812294>
- Instituto Nacional de Geografía y Estadística (INEGI). (2017). *Información topográfica carta G14-5 Reynosa escala 1:250000, serie VI*. <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=889463836452>
- Jiménez Pérez, J., Alanís Rodríguez, E., González Tagle, M. A., Aguirre Calderón, O. A., & Treviño Garza, E. J. (2013). Characterizing regeneration of woody species in areas with different land-history tenure in the tamaulipan thornscrub, Mexico. *Southwestern Naturalist*, 58(3), 299–304. <https://doi.org/10.1894/0038-4909-58.3.299>
- Jiménez, J., Alanís, E., Ruiz, J. L., González, M. A., Yerena, J. I., & Alanís, G. J. (2012). Diversidad de la regeneración leñosa del matorral espinoso tamaulipeco con historial agrícola en el Noreste de México. *CIENCIA UANL*, 15(58), 66–71. <http://www.uanl.mx/publicaciones>
- Magurran, A. E. (2004). *Measuring biological biodiversity*. Blackwell Publishing. <http://www.bio-nica.info/Biblioteca/Magurran2004MeasuringBiological.pdf>
- Manzanilla, G. E., Mata, J. M., Treviño, E., Aguirre, O. A., Alanís, E. A., & Yerena, J. I. (2020). Diversidad, estructura y composición florística de bosques templados del sur de Nuevo León. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 11(16), 94–123. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v11i16.703>
- Mata-Balderas, J. M., Hernández-Cárdenas, S. E., Alanís-Rodríguez, E., & Mora-Olivo, A. (2020). Riqueza, composición y abundancia de especies en una comunidad vegetal ribereña en el río Santa Catarina, Monterrey, Nuevo León. *CienciaUAT*, 14(2), 6–20. <https://doi.org/10.29059/cienciauat.v14i2.1248>
- Mata Balderas, J. M., Treviño Garza, E. J., Jiménez Pérez, J., Aguirre Calderón, Ó. A., Alanís Rodríguez, E., & Mora Olivo, A. (2015). Estructura y composición florística del matorral desértico rosetófilo del noreste de México. *CIENCIA UANL*, 18(75), 67–74. <http://eprints.uanl.mx/8244/1/Documento10.pdf>
- Matteucci, S. D., & Silva, M. (2005). Selección de métricas de configuración espacial para la regionalización de un territorio antropizado. *GeoFocus. International Review of Geographical Information Science and Technology*, (5), 180–202. <https://www.geofocus.org/index.php/geofocus/article/view/65>
- McGarigal, K., & Marks, B. (1995). FRAGSTATS: Spatial pattern analysis program for quantifying landscape structure. <https://doi.org/10.2737/PNW-GTR-351>
- Molina-Guerra, V. M., Mora-Olivo, A., Alanís-Rodríguez, E., Soto-Mata, B., & Patiño-Flores, A. M. (2019). *Plantas características del matorral espinoso tamaulipeco en México*. Editorial Universitaria de la Universidad Autónoma de Nuevo León. <https://libros.uat.edu.mx/index.php/librosuat/catalog/view/220/181/532-1>
- Mora, C. A., Alanís, E., Jiménez, J., González, M. A., Yerena, J. I., & Cuellar, L. G. (2013a). Estructura, composición florística y diversidad del matorral espinoso tamaulipeco, México. *Ecología Aplicada*, 12(1), 29–34. <http://www.scielo.org.pe/pdf/ecol/v12n1/a04v12n1>
- Mora, C. A., Jiménez, J., Alanís, E., Rubio, E. A., Yerena, J. I., & González, M. A. (2013b). Efecto de la ganadería en la composición y diversidad arbórea y arbustiva del matorral espinoso tamaulipeco. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 17(4), 124–137. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v4i17.426>
- Mueller-Dombois, D., & Ellenberg, D. (1974). *Aims and methods of vegetation ecology*. John Wiley & Sons. https://www.researchgate.net/publication/259466952_Aims_and_Methods_of_Vegetation_Ecology
- Olivares, B. A., & López-Beltrán, M. A. (2019). Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada aplicado al territorio indígena agrícola de Kashaama, Venezuela. *Cuadernos de Investigación UNED*, 11(2). <https://doi.org/10.22458/urj.v11i2.2299>
- Patiño-Flores, A. M., Alanís-Rodríguez, E., Jurado, E., González-Rodríguez, H., Aguirre-Calderón, O. A., & Molina-Guerra, V. M. (2021). Estructura y diversidad del matorral espinoso tamaulipeco regenerado posterior a uso pecuario. *Polibotánica*, 52, 75–88. <https://doi.org/10.18387/polibotanica.52.6>
- Patiño-Flores, A. M., Alanís-Rodríguez, E., Molina-Guerra, V. M., Jurado, E., González-Rodríguez, H., Aguirre-Calderón, O. A., & Collantes-Chávez, C. A. (2022). Regeneración natural en un área restaurada del matorral espinoso tamaulipeco del Noreste de México. *Revista Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, 9(1), 1–7. <https://doi.org/10.19136/era.a9n1.2853>
- Pequeño-Ledezma, M. A., Alanís-Rodríguez, E., Jiménez-Pérez, J., Aguirre-Calderón, O. A., González-Tagle, M. A., & Molina-Guerra, V. M. (2017). Análisis estructural de dos áreas del matorral espinoso tamaulipeco del noreste de México. *Madera y Bosques*, 23(1), 121–132. <https://doi.org/10.21829/myb.2017.2311125>

- Pequeño Ledezma, M. Á., Alanís Rodríguez, E., Molina Vera, M., Collantes-Chávez-Costa, A., & Mora-Olivo, A. (2021). Structure and diversity of a shrub *Helietta parvifolia* (A. Gray ex Hemsl.) Benth. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 12(63), 88–113. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v12i63.762>
- QGIS Desktop. (2022). QGIS. Un Sistema de Información Geográfica libre y de código abierto. (versión 3.26.3) [Software]. <https://download.qgis.org/downloads/>
- Ramírez, J. D., Garcés, A., & Arrieta, J. S. (2016). Distribución óptima de turbinas en parques eólicos mediante PSO considerando el efecto sombra. *Tecnura*, 20(47), 49–55. <https://doi.org/10.14483/udistrital.jour.tecnura.2016.1.a04>
- Reyes, C. H., González, L. A., Cevallos, M., Realpe, K., Estrada, E., & Delgado, F. (2022). Fragmentación del paisaje en la cuenca del Río Esmeraldas-Ecuador. *Sapienza: International Journal of Interdisciplinary Studies*, 3(1), 1227–1238. <https://doi.org/10.51798/sijis.v3i2.301>
- Reyna-González, Á. M., Soto-Borrego, P. S., Alanís-Rodríguez, E., Molina-Guerra, V. M. & Collantes-Chávez-Costa, A. (2021). Estructura y diversidad del matorral xerófilo en el noreste de México. *Polibotánica*, 51(26), 07–122. <https://doi.org/10.18387/polibotanica.51.7>
- Robles, F. G. (2017). Impactos a la biodiversidad por parques eólicos en el noreste de México. *Revista Política, Globalidad y Ciudadanía*, 3(6), 41–49. <https://doi.org/10.29105/pgc3.6-3>
- Rodríguez-Echeverry, J., & Leiton, M. (2021). Pérdida y fragmentación de ecosistemas boscosos nativos y su influencia en la diversidad de hábitats en el hotspot Andes tropicales. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 92, e923449. <https://doi.org/10.22201/ib.20078706e.2021.92.3449>
- Sader, S. A., & Winne, J. C. (1992). RGB-NDVI Colour composites for visualizing forest change dynamics. *International Journal of Remote Sensing*, 13(16), 3055–3067. <https://doi.org/10.1080/01431169208904102>
- Sarmiento-Muñoz, T. I., Alanís-Rodríguez, E., Mata-Balderas, J. M., & Mora-Olivo, A. (2019). Estructura y diversidad de la vegetación leñosa en un área de matorral espinoso tamaulipeco con actividad ganadera en Nuevo León, México. *Revista Ciencia UAT*, 14(1), 31–44. <https://doi.org/10.29059/cienciauat.v14i1.1001>
- Silva-García, J. E., Aguirre-Calderón, O. A., Alanís-Rodríguez, E., Jurado-Ybarra, E., Jiménez-Pérez, J., Vargas-Larreta, B., & Corral-Rivas, J. J. (2022). Influencia en la altitud y exposición en la estructura y composición de un bosque templado en Durango. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 13(70), 64–84. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v13i70.1163>
- Turner, E. H., & Díaz-Bautista, A. (2009). Desarrollo e integración del norte de México y el sur de los EUA a partir del análisis de la evolución de las ciudades fronterizas. *Análisis Económico*, 24(57), 141–168. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=41312227008>
- Valdez, C. G., Guzmán, M. A., Valdés, A., Forougbakhch, R., Alvarado, M. A., & Rocha, A. (2018). Estructura y diversidad de la vegetación en un matorral espinoso prístino de Tamaulipas, México. *Revista de Biología Tropical*, 66(4), 1674–1682. <https://www.scielo.sa.cr/pdf/rbt/v66n4/0034-7744-rbt-66-04-1674.pdf>
- Vargas-Vázquez, V. A., Sánchez-Rangel, N. I., Vázquez-Reyes, C. J., Martínez-Ávalos, J. G., & Mora-Olivo, A. (2022). Composition and structure of a low semi-thorn shrubland in Northeastern Mexico. *Botanical Sciences*, 100(3), 748–758. <https://doi.org/10.17129/botsci.2970>
- Vega-Vela, V., Muñoz-Robles, C. A., Rodríguez-Luna, E., López-Acosta, J. C., & Serna-Lagunes, R. (2018). Análisis de la fragmentación del paisaje de la Reserva de la Biosfera Los Tuxtlas, Veracruz, México. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, 5(14), 227–238. <https://doi.org/10.19136/era.a5n14.1442>
- Whittaker, R. H. (1960). Vegetation of the Siskiyou Mountains, Oregon and California. *Ecological Monographs*, 30(3), 279–338. <https://doi.org/10.2307/19435>