



TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO

Instituto Tecnológico de Ciudad Victoria

División de Estudios de Posgrado e Investigación

TESIS

Para obtener el grado de:

Doctor en Ciencias en Biología

(Clave de CONAHCYT 003351)

EVALUACIÓN DEL AGOSTADERO Y DOS VARIEDADES DE NOPAL FORRAJERO (*Opuntia ficus indica* (L.) Mill., 1768) EN EL ALTIPLANO TAMAULIPECO

Presenta:

M. en C. Lucas Hernández Hernández

No de control: **G-20380018**

Directora

Dra. Ludivina Barrientos Lozano

Codirector

Dr. Pedro Almaguer Sierra

Asesor

Dr. Uriel J. Sánchez Reyes

Asesora

Dra. Aurora Y. Rocha Sánchez

Asesor

Dr. Juan Flores Gracia

Ciudad Victoria, Tamaulipas, México. Marzo de 2025



Cd. Victoria, Tamaulipas, **30/enero/2025**
Asunto: Carta de autorización de impresión de tesis

C. DRA. ADRIANA MEXICANO SANTOYO
Jefa de la DEPI
Presente

Como miembros del Comité Tutorial del estudiante **C. Lucas Hernández Hernández** del programa de **Doctorado en C. en Biología**, con Número de Control **G-20380018**, certificamos que después de haber sometido a revisión académica la tesis titulada: **"EVALUACIÓN DEL AGOSTADERO Y DOS VARIEDADES DE NOPAL FORRAJERO (*Opuntia ficus indica* (L.) Mill., 1768) EN EL ALTIPLANO TAMAULIPECO"**, que fue dirigida por la **C. Dra. Ludivina Barrientos Lozano** y codirigida por el **C. Dr. Pedro Almaguer Sierra**, acordamos la **ACEPTACIÓN** del documento para obtener el grado de **DOCTOR EN CIENCIAS EN BIOLOGÍA**, dado que cumple con los criterios expresados en los lineamientos para la Operación de Estudios de Posgrado del Tecnológico Nacional de México.

ATENTAMENTE
Comité Tutorial
Excelencia en Educación Tecnológica®
"Verdad, Honestidad y Servicio"

Dra. Ludivina Barrientos Lozano
DIRECTORA DE TESIS

Dr. Pedro Almaguer Sierra
CODIRECTOR DE TESIS

Dr. Uriel Jeshua Sánchez Reyes
TUTOR 1

Dra. Aurora Y. Rocha Sánchez
TUTOR 2



2025
Año de
La Mujer
Indígena

Blvd. Emilio Portes Gil No. 1301, C.P. 87010 Cd.
Victoria, Tamaulipas Tel. (834) 153-2000, Ext. 180
e-mail: dir_cdvictoria@tecnm.mx
tecnm.mx | cdvictoria.tecnm.mx



Posgrado
M00-PM-AUT_IMT_TESIS-F04



Educación
Secretaría de Educación Pública



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO



Instituto Tecnológico de Ciudad Victoria
Subdirección Académica
División de Estudios de Posgrado e Investigación

Dr. Juan Flores Gracia
TUTOR 3



2025
Año de
La Mujer
Indígena

Blvd. Emilio Portes Gil No. 1301, C.P. 87010 Cd.
Victoria, Tamaulipas Tel. (834) 153-2000, Ext. 180
e-mail: dir_cdvictoria@tecnm.mx
tecnm.mx | cdvictoria.tecnm.mx



Posgrado
M00-PM-AUT_IMT_TESIS-F04





Instituto Tecnológico de Ciudad Victoria
Subdirección Académica
División de Estudios de Posgrado e Investigación

Cd. Victoria, Tamaulipas. **13/febrero/2025**

Asunto: Constancia de originalidad

A QUIEN CORRESPONDA

La que suscribe, **C. Ludivina Barrientos Lozano**, coordinadora del programa de **Doctorado en C. en Biología** del Instituto Tecnológico de Ciudad Victoria, hace constar que la tesis titulada "EVALUACIÓN DEL AGOSTADERO Y DOS VARIEDADES DE NOPAL FORRAJERO (*Opuntia ficus indica* (L.) Mill., 1768) EN EL ALTIPLANO TAMAULIPECO", fue desarrollada por el estudiante **Lucas Hernández Hernández**, con número de control **G-20380018**, bajo la dirección de la **C. Ludivina Barrientos Lozano** y codirección del **C. Pedro Almaguer Sierra**, que el documento de tesis fue evaluado con el software Turnitin y se encontró que presenta una semejanza del **22 %** respecto a contenidos publicados en internet.

Por tal motivo, se extiende la presente **CONSTANCIA DE ORIGINALIDAD** en Ciudad Victoria, Tamaulipas, a los **trece días del mes de febrero de dos mil veinticinco**.

ATENTAMENTE

Excelencia en Educación Tecnológica
"Verdad, Honestidad y Servicio"

C. Dra. Ludivina Barrientos Lozano
Coordinación Doctorado en C. en Biología

c. c. p. Archivo Coordinación.
c. c. p. Expediente.



2025
Año de
La Mujer
Indígena

Blvd. Emilio Portes Gil No. 1301, C.P. 87010 Cd.
Victoria, Tamaulipas. Tel. (834) 153-2000, Ext. 180
e-mail: dir_cd victoria@tecnm.mx
tecnm.mx | cdvictoria.tecnm.mx



Posgrado
M00-PM-AUT_IMT_TESIS-F06



Instituto Tecnológico de Ciudad Victoria
Subdirección Académica
División de Estudios de Posgrado e Investigación

Cd. Victoria, Tamaulipas, 13/febrero/2025

OFICIO No: DEPI-037/2025

Asunto: Autorización de impresión de tesis

LUCAS HERNÁNDEZ HERNÁNDEZ
Candidato al Grado de Doctor en Ciencias en Biología
No. Control: G-20380018
Presente

Por recomendación de su **H. Comité Tutorial**, se le **AUTORIZA** imprimir y reproducir digitalmente la Tesis:
"EVALUACIÓN DEL AGOSTADERO Y DOS VARIABLES DE NOPAL FORRAJERO (*Opuntia ficus indica* (L.) Mill., 1768) EN EL ALTIPLANO TAMAULIPECO", que tuvo a bien desarrollar en la División de Estudios de Posgrado e Investigación de este instituto.

ATENTAMENTE
Excelencia en Educación Tecnológica®
"Verdad, Honestidad y Servicio"

ADRIANA MEXICANO SANTOYO
JEFA DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN



C.c. p. Archivo

Posgrado
M00-PM-AUT_IMT_TESIS-F07



2025
Año de
La Mujer
Indígena

Blvd. Emilio Portes Gil No. 1301, C.P. 87010 Cd.
Victoria, Tamaulipas Tel. (834) 153-2000, Ext. 325
e-mail: dposgrado@cdvictoria.tecnm.mx
tecnm.mx | cdvictoria.tecnm.mx





Cd. Victoria, Tamaulipas, 14/febrero/2025
Asunto: Carta de sesión de derechos

En Cd. Victoria, Tamaulipas, a **14 de febrero de 2025**, el que suscribe, **C. Lucas Hernández Hernández**, estudiante del programa de **Doctorado en C. en Biología** del Instituto Tecnológico de Cd. Victoria, con número de control **G-20380018**, manifiesto que soy autor intelectual de la presente tesis, la cual fue dirigida por la **Dra. Ludivina Barrientos Lozano**, cedo íntegramente los derechos del trabajo de tesis titulado **“EVALUACIÓN DEL AGOSTADERO Y DOS VARIEDADES DE NOPAL FORRAJERO (*Opuntia ficus indica* (L.) Mill., 1768) EN EL ALTIPLANO TAMAULIPECO”**, al Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Cd. Victoria para su uso con fines académicos y de investigación.

Los usuarios pueden consultar y reproducir el contenido para todos los usos que tengan finalidad académica siempre y cuando sea citada la fuente de información.

Lucas Hernández Hernández

Posgrado
M00-PM-AUT_IMT_TESIS-F08

Blvd. Emilio Portes Gil No. 1301, C.P. 87010 Cd.
Victoria, Tamaulipas Tel. (834) 153-2000, Ext. 180
e-mail: dir_cd victoria@tecnm.mx
tecnm.mx | cd victoria.tecnm.mx
www.fanic.tecnm.mx



2025
Año de
**La Mujer
Indígena**

Dedicatorias

A mi amada esposa (Sarahí) por la comprensión, confianza y apoyar este anhelo profesional.

A mi hijo (Lucas Leonardo) el cariño más puro y sincero, sostén de vida que me motiva a ser cada día mejor ser humano.

A mis padres (Lidia y Lucas) con todo el cariño y respeto que merecen por que depositaron su confianza para que pudiera lograr mis anhelos, por sus consejos, regaños y por tenderme su mano cuando flaqueaba. A ustedes por siempre mi dedicación y el más profundo agradecimiento.

A mis hermanos con el respeto y admiración que se merecen, por haber inculcado en mí ese deseo inmenso de superación y los anhelos de éxito en la vida. Estas palabras son cortas al inmenso apoyo, comprensión y sus acertados consejos que me brindaron en los pasajes difíciles, espero no defraudarlos y seguir contando con su valioso apoyo.

A mis amigos por los malos y buenos momentos que hemos pasado a pasos cortos y largos en el camino de la vida.

Agradecimientos

En las siguientes líneas deseo expresar mi más sincero agradecimiento a las instituciones y personas que con su soporte científico y humano han contribuido a la realización de este trabajo de investigación.

Deseo agradecer al Tecnológico Nacional de México (TecNM) Campus Cd. Victoria, por permitirme realizar mis estudios de doctorado y poner a mi disposición al personal altamente calificado y conocimiento en la materia y seguir en el camino científico. Así mismo, al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT) por el apoyo económico brindado durante la estancia académica.

De manera muy especial a mi comité de tesis a los doctores: Pedro Almaguer Sierra, Ludivina Barrientos Lozano, Uriel J. Sánchez Reyes, Aurora Y. Rocha Sánchez y Juan Flores Gracia, gracias por su profesionalismo al momento de realizar las observaciones y revisiones en cada sesión tutorial, por el empeño y dedicación para obtener un producto de calidad.

Agradezco enormemente a los productores Silverio Reyes Rosales y J. Antonio Reyes Rosales, por su apoyo al momento del establecimiento de los experimentos y las facilidades para realizar el levantamiento de datos en campo y por realizar réplicas de este trabajo de investigación en sus parcelas.

RESUMEN

Los agostaderos en regiones áridas y semiáridas son la principal fuente de alimentación del ganado. Sin embargo, el pastoreo continuo provoca la fragmentación de estos ecosistemas, lo que altera los procesos ecológicos, la estructura y funcionalidad de las comunidades vegetales. Estas zonas enfrentan además períodos prolongados de sequías y temperaturas extremas, que disminuyen la producción y disponibilidad de forraje para el ganado. El Nopal forrajero (*Opuntia ficus-indica*) es una alternativa viable gracias a la capacidad de adaptarse al estrés hídrico, altas temperaturas, el viento, a la radiación solar, además de producir más materia seca por milímetro de lluvia que cualquier otro tipo de vegetal. El objetivo de este estudio fue conocer el estado actual del agostadero en el Altiplano Tamaulipeco y evaluar la respuesta de dos variedades de nopal forrajero mediante prácticas de agricultura intensiva sustentable en Tula, Tamaulipas. Para ello, se analizaron imágenes satelitales Landsat del período 1973-2020, clasificadas en cuatro categorías mediante segmentación y análisis de máxima verosimilitud. Se utilizó un método de tabulación cruzada para determinar el grado de sucesión en los agostaderos. Además, se evaluaron seis tratamientos consistentes en dos variedades de *Opuntia ficus-indica*, una densidad de plantación y tres niveles de fertilización, empleando un sistema de riego por goteo. En tres de las cinco áreas analizadas en el periodo de 1973 a 2020 se encontró un incremento de las áreas de agostadero. Conforme aumentan las áreas de agostadero, disminuye la cobertura de bosques de pino-encino, matorral espinoso submontano y áreas antropogénicas. Los procesos de perturbación no fueron lineales y el incremento de las áreas de agostadero fue mayor en el matorral xerófilo y la vegetación secundaria. En cuanto a los tratamientos evaluados, la Variedad Villanueva, con una densidad de 8 plantas por m² y 35 kg de fertilizante orgánico (6-V0835), presentó el mejor desempeño, alcanzando una producción de 4.16 kg de materia seca por m² (41.6 t/ha) y 41.6 kg de materia fresca por m² (410 t/ha). La mayor producción de biomasa se registró en otoño, mientras que el tratamiento menos eficiente (4-V0800) produjo 0.29 kg de materia seca por m². Este trabajo es la primera contribución que evalúa los cambios en el uso y cobertura del suelo en agostaderos del Altiplano de Tamaulipeco comprometidos por el pastoreo continuo. Además, es pionero en evaluar altas dosis de fertilización en el Nopal Forrajero para esta región. Los resultados destacan la

importancia de integrar cultivos alternativos y practicas sostenibles para mitigar los impactos del pastoreo continuo, fomentar la coexistencia entre fauna silvestre y ganado, y promover la recuperación de los agostaderos.

Contenido

1.- Introducción.....	12
2. Antecedentes	14
2.1 Agostadero	14
2.1.1 Deterioro de los agostaderos	15
2.1.2 Áreas para el pastoreo	17
2.2 Biomasa	18
2.2.1 Descripción de variedades.....	22
3. Hipótesis	23
4. Objetivo general.....	23
4.1 Objetivos específicos	23
5. Materiales y Métodos	24
5.1 Descripción del área de estudio.....	24
5.1.1 Evaluación del agostadero.....	24
5.1.2 Producción de biomasa.....	27
5.2. Evaluación del agostadero	27
5.2.1 Adquisición y pre-procesamiento de datos.....	27
5.2.2. Análisis de la sucesión.....	30
5.3 Producción de biomasa	33
5.3.1 Características del suelo	33
5.3.2 Preparación del terreno.....	34
5.3.3 Establecimiento del experimento.....	35
5.3.4 Toma de datos morfológicos	37
5.3.5 Análisis estadístico	38
6. Resultados	40
6.1 Evaluación del agostadero	40
6.1.1 Cambios en el uso del suelo y la cobertura vegetal en San Rafael, Tula, Tamaulipas	40
6.1.2 Cambios en el uso del suelo y la cobertura vegetal en San Antonio, Jaumave, Tamaulipas.	44
6.1.3 Cambios en el uso del suelo y la cobertura vegetal en La Peña, Miquihuana, Tamaulipas.	49
6.1.4 Cambios en el uso del suelo y la cobertura vegetal en San Vicente, Palmillas, Tamaulipas	53

6.1.5 Cambios de uso de suelo y cobertura vegetal en El Llano y Anexas, Bustamante, Tamaulipas	58
6.2 Producción de Biomasa.....	63
6.2.1 Productividad en el forraje de <i>Opuntia ficus-indica</i> Mill. (L.).....	63
6.2.2 Análisis estadístico	67
7. Discusión.....	69
7.1 Evaluación del agostadero	69
7.1.1 Permanencia, sucesión o recuperación de las zonas de agostadero	69
7.1.2 Categorías sucesionales en áreas de agostaderos	72
7.1.3 Uso de categorías sucesionales como propuesta para la delimitación de áreas de exclusión, restauración y rotación de agostaderos en el Altiplano Tamaulipeco	75
7.2 Producción de Biomasa.....	77
7.2.1 Productividad en el forraje de <i>Opuntia ficus-indica</i> Mill. (L.).....	77
7.2.2 Indicadores morfológicos en <i>Opuntia</i> Forrajera.....	79
7.2.3 Estacionalidad productiva en <i>Opuntia ficus indica</i>	81
8. Conclusiones.....	82
9. Literatura Citada.....	84
10. ANEXOS	114
10.2 Artículo publicado; Patterns of Change and Successional Transition in a 47-Year Period (1973–2020) in Rangelands of the Tamaulipan Highlands, Northeastern Mexico	114

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Localización del Altiplano Tamaulipeco (AT) en Tamaulipas, México.	25
Figura 2. Resumen del proceso para la delimitación de categorías sucesionales.....	31
Figura 3. Análisis de suelo en parcela de la localidad 5 de mayo (Cebollitas), Tula, Tamaulipas.	34
Figura 4. Análisis de fertilizante usado en los experimentos.	35
Figura 5. Diseño experimental. a) área muestral b) cama diseñada para el establecimiento del experimento y sus repeticiones c) modelo del experimento en la parcela.....	36
Figura 6. Experimentos establecidos a) réplica 1 b) réplica 2.....	36
Figura 7. Material vegetativo usado en experimento. a) Plantas madre en parcela b) <i>Opuntia ficus-indica</i> Var. Villanueva c) <i>Opuntia ficus-indica</i> Var. Copena-V1 d) cladodios con tratamiento antes de su plantación.....	37
Figura 8. Toma de datos morfológicos en experimento	38
Figura 9. Cobertura y cambios de uso del suelo en el periodo de estudio, San Rafael, Tula, Tamaulipas, México.	40
Figura 10. Cobertura de uso de suelo en 1973, 1980, 1986, 2000, 2005, 2009, 2016 y 2020, San Rafael, Tula, Tamaulipas, México.	41
Figura 11. Porcentaje de cambios en la cobertura del suelo en las escenas de (a) 1973-1980, (b) 1980-1986, (c) 1986-2000, (d) 2000-2005, (e) 2005-2009, (f) 2009-2016, y (g) 2016-2020, San Rafael, Tula, Tamaulipas, México.....	42
Figura 12. Área representada (km ²) para cada categoría de uso de suelo durante el periodo de estudio, San Rafael, Tula, Tamaulipas, México.	43
Figura 13. Categorías sucesionales de cobertura y cambio de uso de suelo, San Rafael, Tula, Tamaulipas, México.	43
Figura 14. Cobertura y cambios de uso del suelo en el periodo de estudio, San Antonio, Jaumave, Tamaulipas, México.	44
Figura 15. Cobertura de uso de suelo en 1973, 1980, 1986, 2000, 2005, 2009, 2016 y 2020, San Antonio, Jaumave, Tamaulipas, México.	45
Figura 16. Porcentaje de cambio de cobertura terrestre en escenas de (a) 1973–1980, (b) 1980–1986, (c) 1986–2000, (d) 2000–2005, (e) 2005–2009, (f) 2009–2016, y (g) 2016–2020, San Antonio, Jaumave, Tamaulipas, México.	46

Figura 17. Área representada (km ²) para cada categoría de uso de suelo durante el periodo de estudio, San Antonio, Jaumave, Tamaulipas, México.	47
Figura 18. Categorías sucesionales de cobertura y cambios de uso de suelo, San Antonio, Jaumave, Tamaulipas, México.	48
Figura 19. Cobertura y cambios de uso del suelo en el periodo de estudio, La Peña, Miquihuana, Tamaulipas, México.	49
Figura 20. Cobertura de uso de suelo en 1973, 1980, 1986, 2000, 2005, 2009, 2016 y 2020, La Peña, Miquihuana, Tamaulipas, México.	50
Figura 21. Porcentaje de cambios en la cobertura del suelo en los escenarios de (a) 1973-1980, (b) 1980-1986, (c) 1986-2000, (d) 2000-2005, (e) 2005-2009, (f) 2009-2016, y (g) 2016-2020, La Peña, Miquihuana, Tamaulipas, México.	51
Figura 22. Área representada (km ²) para cada categoría de uso de suelo durante el periodo de estudio, La Peña, Miquihuana, Tamaulipas, México.	52
Figura 23. Categorías sucesionales de cobertura y cambios de uso del suelo, La Peña, Miquihuana, Tamaulipas, México.	53
Figura 24. Cobertura y cambios de uso del suelo en el periodo de estudio, San Vicente, Palmillas, Tamaulipas, México.	54
Figura 25. Cobertura de uso de suelo en 1973, 1980, 1986, 2000, 2005, 2009, 2016 y 2020, San Vicente, Palmillas, Tamaulipas, México.	55
Figura 26. Porcentaje de cambios en la cobertura terrestre en escenas de (a) 1973-1980, (b) 1980-1986, (c) 1986-2000, (d) 2000-2005, (e) 2005-2009, (f) 2009-2016 y (g) 2016-2020, San Vicente, Palmillas, Tamaulipas, México.	56
Figura 27. Área representada (km ²) para cada categoría de uso de suelo durante el periodo de estudio, San Vicente, Palmillas, Tamaulipas, México.	57
Figura 28. Categorías de cobertura sucesional y cambios en el uso del suelo, San Vicente, Palmillas, Tamaulipas, México.	58
Figura 29. Cobertura y cambios de uso del suelo en el período de estudio, El Llano y Anexas, Bustamante, Tamaulipas, México.	59
Figura 30. Cobertura de uso de suelo en 1973, 1980, 1986, 2000, 2005, 2009, 2016 y 2020, El Llano y anexas, Bustamante, Tamaulipas, México.	60

Figura 31. Porcentaje de cambios en la cobertura de suelo en escenas de (a) 1973-1980, (b) 1980-1986, (c) 1986-2000, (d) 2000-2005, (e) 2005-2009, (f) 2009-2016 y (g) 2016-2020, El Llano y Anexas, Bustamante, Tamaulipas, México.	61
Figura 32. Área representada (km ²) para cada categoría de uso de suelo durante el periodo de estudio, El Llano y Anexas, Bustamante, Tamaulipas, México.	62
Figura 33. Categorías sucesionales de cobertura y cambios de uso de suelo, El Llano y Anexas, Bustamante, Tamaulipas, México.	63
Figura 34. Producción de materia fresca y materia seca, en los tratamientos evaluados, durante un año	65
Figura 35. Producción de materia seca en las cuatro estaciones del año	66
Figura 36. Centroides en los dos ejes discriminantes de los tratamientos evaluados, definidos por los componentes canónicos de la raíz 1 y 2.	69

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Características de las escenas Landsat y algunos parámetros utilizados para el análisis de cambios en la cobertura de los agostaderos y uso del suelo en el Altiplano Tamaulipeco, Tamaulipas, México.	28
Tabla 2. Categorías de uso/cobertura del suelo (LULC) en el Altiplano Tamaulipeco, Tamaulipas, México.	30
Tabla 3. Número de categorías resultantes de la “imagen de transición” para cada Ejido del Altiplano Tamaulipeco, Tamaulipas, México.	32
Tabla 4. Elementos para formación de variable categórica	38
Tabla 5. Variables categóricas formadas	38
Tabla 6. Parámetros productivos obtenidos en los tratamientos analizados durante el periodo evaluado.....	64
Tabla 7. Parámetros morfológicos en las cuatro estaciones del año.....	66
Tabla 8. Comparación por pares en los tratamientos evaluados. Grados de libertad = 7,108.	67
Tabla 9. Valores de correlación entre las variables morfológicas y las dos primeras raíces del análisis de funciones discriminantes.....	68

1.- Introducción

Se considera agostadero a todas aquellas áreas naturales del mundo que no son desiertos áridos, cultivos, roca sólida, glaciares u hormigón, los cuales sirven como fuente de alimento de herbívoros ungulados (Squires 2010; Heady y Child 2019). Están estrechamente relacionados con el pastoreo extensivo y se caracterizan por el tipo de vegetación y clima (INEGI 2004). A nivel mundial, se incluyen pastos naturales, matorrales, sabanas y algunos tipos de bosques (Holechek *et al.*, 1989), cubren entre el 40 y 50% de la superficie terrestre mundial (Mitchell 2000) y en México ocupan el 58% del territorio (Martínez-Rojas y Torres-Torres 2018; INEGI 2022). Se consideran sistemas dinámicos influenciados por múltiples factores, como el clima, la topografía, características del suelo, regímenes de pastoreo, incendios, cambio climático, vías de comunicación, expansión urbana, agrícola, ganadera, minera, turística y otras perturbaciones (Nellemann 2001; Malhi *et al.*, 2021; Enríquez-Quiroz *et al.*, 2021; Siller-Clavel *et al.*, 2022). Al respecto, contribuyen al sustento de entre 1 y 2 mil millones de personas que viven y dependen directamente de los agostaderos (Sayre *et al.*, 2013; Reid *et al.*, 2014; AU-IBAR 2015). Sin embargo, se estima que a nivel mundial se han degradado alrededor del 20% (Brunson 2014).

Ante estas consecuencias se han creado políticas públicas y programas sociales que han beneficiado a los agostaderos y sus habitantes (Banks 2003), aunque la mayoría no ha tenido éxito y han demostrado ser social y/o ecológicamente desastrosos (Scoones 1993; Niamir-Fuller 1999). Por lo que, deben comenzar a evaluarse con un enfoque multifactorial, las fuentes de su marginalidad, el impacto ecológico y social, así como la transformación hacia otros usos de la tierra y su potencial sostenible (Sayre *et al.*, 2013). Es sustancial realizar estudios que evalúen los procesos de recuperación de las comunidades vegetales, así como los efectos de dichas alteraciones a la fauna (Sánchez-Reyes *et al.*, 2017). Además, es interesante conocer si la alteración provocada por el ganado se recupera o es permanente, si el pastoreo continuo causa cambios de un tipo de vegetación a otro, como de pastizal a matorral o viceversa (Silcock y Fensham 2013). Puesto que en un territorio convergen varios tipos de vegetación, es trascendental conocer los impactos a nivel local (Kaufmann *et al.*, 2019). Esto permitirá conocer la capacidad de carga y cobertura vegetal en un determinado predio, si la productividad aumenta o disminuye, permitirá plantearse estrategias de recuperación y restauración a corto, mediano y largo plazo, de una forma holística (Ünal *et*

al., 2013; Ulziiabaatar y Matsui 2021). Puesto que, son las comunidades locales encargadas de manejar directamente los recursos naturales (Alcalá-Galván 2018). Todo ello, se puede llevar a cabo, a través de observaciones de cambios a lo largo del tiempo y el espacio (Sepúlveda-Varas 2019). En este sentido estudios demuestran la posibilidad de utilizar información satelital empleando modelos biofísicos simples para conocer el crecimiento de la vegetación (Hernández-Clemente y Hornero 2021). Existen métodos eficaces y recientes para detectar y cuantificar el cambio de uso y cobertura del suelo, empleando la teledetección y la implementación de información geográfica, con el análisis de imágenes satelitales que permiten la detección de patrones temporales de cambio en la vegetación (Fan 2007; Soffianian y Madanian 2015) e inclusive se pueden realizar predicciones (González 2021). Aun nado a ello, en las zonas áridas y semiáridas, se presentan períodos largos de sequías con temperaturas extremas que bajan la producción y disponibilidad de forraje para los animales (Rodrigues *et al.*, 2016). Debido al proceso fotosintético llamado CAM (Metabolismo Acido Crasuláceo (CAM) el Nopal (*Opuntia* spp.) tiene la capacidad de adaptarse al estrés hídrico, altas temperaturas, el viento, a la radiación solar, además de producir más materia seca por milímetro de lluvia que cualquier otro tipo de vegetal (Donato *et al.*, 2014; Guevara *et al.*, 2009; Nefzaoui y El Mourid, 2007). Estas plantas pertenecen a la familia Cactaceae; en el mundo se reportan alrededor de 258 especies de *Opuntia* sp. y en México ocurren alrededor de 100, por lo que se considera al país como centro de origen (Ríos y Quintana 2004).

Opuntia spp., como cultivo está enfocado a la producción de verdura, tuna, forraje, biogás y biocombustibles (SAGARPA 2015). En las regiones áridas y semiáridas de México y en el mundo, el nopal se utiliza como forraje, principalmente en periodos de sequía en los que ganaderos queman las espinas y permiten al ganado consumir los cladodios como recurso alimenticio e hídrico (Córdova-Torres *et al.*, 2017; Valdez *et al.*, 2001). Los países que más utilizan al nopal como forraje son México, Sudáfrica, Túnez y Brasil (Felker *et al.* 2006). En este sentido, el nopal es una fuente importante para suplementar la dieta en bovinos, caprinos y ovinos, aunque su calidad está determinada en gran medida por factores como especie, variedad y condiciones abióticas (López *et al.*, 2003). A pesar de la importancia del nopal silvestre y cultivado en la alimentación del ganado (Anaya y Bautista, 2008), la investigación y generación de información básica y aplicada ha estado enfocada hacia la producción de

tuna y verdura, dejando a un lado el enfoque forrajero (SAGARPA, 2015). La propagación asexual de este cultivo permite una rápida expansión productiva: el crecimiento alto desde el brote hasta la raíz y combinado con una alta productividad produce una gran cantidad de biomasa disponible para el ganado (de Cortázar y Nobel, 1992).

En México, la producción de nopal forrajero no es común, esto debido a que las poblaciones silvestres forman parte del agostadero natural y se vuelven un reservorio de forraje para el ganado (Dubeux et al., 2018). Sin embargo, en los últimos años los agostaderos de las zonas áridas han ido modificando su estructura y composición florística (Luna-Vázquez y Urrutia-morales, 2008). Es evidente la presión que tiene la actividad ganadera sobre poblaciones naturales de *Opuntia* sp., por lo que el establecimiento de plantaciones de nopal forrajero constituye una opción para disminuir el efecto, además el cultivo del nopal tiene un efecto ecológico benéfico, ya que las plantas protegen al suelo contra la erosión hídrica y eólica. (Luna-Vázquez y Urrutia-morales, 2008)

En el estado de Tamaulipas particularmente en el Altiplano Tamaulipeco integrado por los municipios de Jaumave, Palmillas, Miquihuana, Bustamante y Tula, se presentan agostaderos principalmente de matorral xerófilo que han dado lugar a la producción de ganado en pastoreo extensivo (García-Fernández y Domínguez-Jardines 2017). Las sequías prolongadas y el sobrepastoreo han llevado a sus pobladores a que incrementen las actividades de cultivo y da cabida a la fragmentación del hábitat (Echavarría-Cháirez 2006). Además, prevalecen las condiciones de escasa y errática precipitación, vientos fuertes, suelos secos con escasa materia orgánica y una drástica oscilación diaria de la temperatura del aire. Los meses de diciembre a junio se caracteriza por la disminución de alimento, en el cual el ganado no logra cubrir las demandas nutricionales. Por lo tanto, el Altiplano Tamaulipeco presenta un ecosistema modelo para monitorear el desgaste de los agostaderos, y en particular, el municipio de Tula es idóneo para establecer plantaciones de nopal forrajero debido a las condiciones agroecológicas que prevalecen en la zona.

2. Antecedentes

2.1 Agostadero

Los agostaderos representan el tipo de cobertura terrestre más extenso de la tierra. Existen varias definiciones, pero la mayoría de los autores abordan tanto un tipo de cobertura

asociado con vegetación o un bioma y un uso del suelo que enfatiza el pastoreo extensivo (Lund 2007). Se incluyen matorrales, pastizales, sabanas, semidesiertos y desiertos (MA 2005). Son tierras con vegetación natural nativa en donde predominan los pastos, hierbas o arbustos leñosos que se utilizan para el pastoreo de ganado o animales de caza y cubren alrededor del 25% de la superficie terrestre (Zerga 2015). La vegetación es heterogénea, con una distribución multiestratificada y se encuentra sujeta a variaciones de calidad (proteína, energía y fibra) y cantidad de forraje (disponibilidad), dependiendo de la época del año y el uso del recurso (Torres-Acosta *et al.*, 2008).

2.1.1 Deterioro de los agostaderos

En México, se calcula que poco más del 54% del territorio nacional tiene cobertura vegetal propia de zonas áridas y semiáridas; dominando, los matorrales, pastizales y áreas de transición de ambientes semiáridos a templados (Rzedowski 1990; Cervantes 2002). Además, es centro de diversificación de familias botánicas como las Cactaceae, Crassulaceae y Agavaceae (Siqueira *et al.*, 1998; Miranda 1955). Sin embargo, tienen un alto grado de degradación debido a los cambios en el uso del suelo (Arriaga 2009). Se calcula que más de 1000 km² anuales en las últimas cuatro décadas están experimentando procesos de sucesión secundaria (SNIARN 2005), por lo cual es de gran importancia realizar investigaciones y monitoreo constante, puesto que convergen especies con alto grado de endemismo.

La degradación de los agostaderos contribuye a la reducción en la capacidad productiva atribuible al sobrepastoreo y la expansión de áreas de cultivo (Bounejmate 2004), así como al manejo insostenible por parte de los ganaderos (Dyksterhuis 1949; Francés y Castelló 2014). La fragmentación de estos ecosistemas han dado lugar a una amplia heterogeneidad de serias implicaciones, como la disminución en la producción ganadera (AU-IBAR 2015), aumento de especies de plantas indeseables, tóxicas y desagradables para el ganado (Arreola-Nava *et al.*, 2000), escasez de especies forrajeras, disminución en la producción de materia seca y la compactación del suelo (Delgado-Padierna 2022), alteración en la estructura y funcionalidad de las comunidades vegetales, flujo de energía y ciclo de nutrientes (CONAZA 2022), así como el aumento en la pobreza global (Rodrigo-Comino *et al.*, 2022). La degradación en el uso y la cobertura del suelo es un desafío importante para el uso y la gestión sostenible de los agostaderos. Es un problema global creciente, que resulta en la pérdida temporal o permanente de las funciones del ecosistema (Schwilch *et al.*, 2012), siendo las

áreas rurales de los países en desarrollo las más afectadas por la disminución en la productividad (Barbier y Hochard 2018).

El pastoreo extensivo afecta la cobertura vegetal y la erosión del suelo. Además, disminuye la calidad del agostadero, propiciando la pérdida de las plantas forrajeras por su consumo y afecta la producción de semillas, así como el establecimiento y la sobrevivencia de las plantas jóvenes, abriendo espacios a plantas invasoras de menor palatabilidad del tipo arbustivas y herbáceas anuales. También se disminuye la acumulación de materia orgánica afectando directamente la estructura y porosidad, así como los regímenes de temperatura y humedad del suelo, infiltración del agua, y fertilidad; con ello, se alteran el crecimiento y establecimiento de nuevas generaciones de plantas. El pisoteo constante de los animales genera la compactación del suelo, lo que afecta el desarrollo de las raíces y el crecimiento de las plantas reduciendo la producción de biomasa. Además, en los ecosistemas de zonas áridas se afecta la cubierta de plantas criptógamas, que protegen al suelo de la erosión hídrica y eólica, y cianobacterias que fijan el nitrógeno atmosférico (Thurow y Taylor 1999).

Para evaluar los cambios en los agostaderos los sistemas de información geográfica son una herramienta de fácil acceso a una gran cantidad de datos geográficos e imágenes satelitales que ha permitido que los análisis aumenten de manera considerable (Wondrade 2014). Se pueden realizar estudios en escalas que comprendan solo unos pocos km², esto garantizará un mayor control sobre los métodos de clasificación y validación que permitan mejorar el análisis de sucesión (Sánchez-Reyes *et al.*, 2017). La percepción remota contribuye en gran medida a la comprensión de los paisajes como sistemas complejos e integrados que permite identificar cambios en el uso o cobertura del suelo o la identificación de problemas ambientales (Paruelo 2008). Ante ello, el índice de diferencia normalizada (NDVI) se calcula como $(NIR - Red) / (NIR + Red)$ donde NIR y Red son las cantidades de luz de los espectros infrarrojo cercano y rojo respectivamente, reflejados por una superficie. Este índice se correlaciona con la radiación fotosintéticamente activa absorbida por las plantas, capacidad fotosintética, producción primaria neta, índice de área foliar, asimilación de carbono y evapotranspiración. El NDVI permite monitorear la fotosíntesis en la vegetación a lo largo del tiempo y hace posibles las comparaciones espacio temporales (Pettorelli *et al.*, 2011).

Entre los métodos que predominan para clasificar el uso del suelo se encuentran la clasificación no supervisada y supervisada por máxima verosimilitud, generalmente realizada

con las herramientas de SIG y el software ERDAS-Imagine. Para validar la información que se genera de las imágenes satelitales, en la mayoría de los estudios se utilizan entrevistas con informantes clave, discusiones con grupos focales y datos de campo. De los usos de suelo que más se han analizado son tierras agrícolas, bosques, agostaderos, cuerpos de agua, áreas pantanosas, matorrales, suelos desnudos, entre otros (Regasa *et al.*, 2012).

2.1.2 Áreas para el pastoreo

La integración de un sistema de producción ganadera sostenible es la selección de tierras apropiadas que cumplan con varias limitaciones ambientales y socioeconómicas, considerando factores como el tipo de suelo, disponibilidad de agua, tipo de vegetación, topografía y el clima. Esto permitirá al ganado una nutrición adecuada, deduce el riesgo de enfermedades y mejora la eficiencia del pastoreo, lo que conlleva a un ganado más saludable y productivo (Acutis *et al.*, 2013). En este sentido los sistemas de información geográfica (SIG) pueden ayudar a identificar áreas adecuadas para la ganadería extensiva o de pastoreo en función de factores como la fertilidad del suelo, la proximidad a fuentes de agua y las limitaciones ambientales (Acutis *et al.*, 2013). Los SIG también permiten mapear el potencial de rendimientos incorporando datos sobre condiciones ambientales y la disponibilidad de nutrientes. Esto ayuda a identificar áreas con mayor productividad, lo que permite una mejor planificación del inventario, producción y gestión sostenible de las áreas de pastoreo (Worqlul *et al.*, 2022).

La pendiente en la superficie terrestre es uno de los elementos topográficos de mayor importancia para determinar si las tierras son aptas para aprovecharse como agostadero (Arulbalaji *et al.*, 2019). Múltiples procesos geológicos y geodinámicos, como es la tasa de infiltración de la escorrentía, la velocidad del flujo superficial, el contenido de la humedad del suelo, el potencial de la erosión y la calidad de la sedimentación se ven reflejados en la pendiente (Rana *et al.*, 2023).

Las condiciones climáticas juegan un papel importante en el desplazamiento del ganado. En cuanto al pastoreo extensivo los animales experimentan cambios constantes en la disponibilidad de alimento, en las diferentes estaciones del año y según la localización geográfica. En este sentido, el contenido de la proteína cruda, humedad y extracto libre de nitrógeno de los arbustos varían conforme a las estaciones del año, lo cual se asocia con la precipitación anual (McIntosh *et al.*, 2019), por lo que se debe buscar mantener un equilibrio

nutricional para la productividad y supervivencia (Ginane *et al.*, 2015). Durante el día el ganado modifica la actividad de pastoreo en respuesta a la variación de la temperatura; los rebaños son más activos por la mañana y en la tarde, mientras que en las horas de mayor intensidad de calor reducen la búsqueda de alimento y optan por acercarse a las fuentes de agua (Zapata-Campo y Mellado-Bosque, 2021).

En el noreste de México en la región árida son las familias botánicas Fabaceae, Ebenaceae, Poaceae, Boraginaceae y Rutaceae las que prefiere el ganado por mayor contenido de proteína y celulosa (Foroughbakhch *et al.*, 2013), por lo que la productividad de los agostaderos estará en función del tipo de ganado, condiciones climáticas, tipo de suelo, elevación y topografía (Ebrahimi *et al.*, 2010). De tal forma, es importante conocer el coeficiente de agostadero para poder seleccionar de manera correcta las áreas adecuadas del agostadero. Este índice determina el número de hectáreas necesarias para alimentar a una unidad animal en un periodo de tiempo determinado (Villarruel-Sahagún *et al.*, 2014). Por ello, es necesario conocer la sostenibilidad, manteniendo un cierto nivel de estabilidad del ecosistema, lo cual es determinado por la presión, composición y régimen de pastoreo (Johnston *et al.*, 1996).

La producción ganadera requiere información suficiente para calcular el potencial del ecosistema y lograr un uso sostenible. Un sitio idóneo proporciona información determinante para la producción ganadera y la planificación a largo plazo. Es por eso que los SIG y las técnicas de teledetección proporcionan una plataforma práctica y eficaz para integrar variables terrestres especialmente complejas y diversas para realizar análisis de áreas ideales para el agostadero (Rana *et al.*, 2023).

2.2 Biomasa

Opuntia ficus-indica es una cactácea con la capacidad para desarrollarse y crecer de forma favorable ante condiciones ambientales limitantes propias de zonas áridas que lo convierten en un cultivo idóneo para producción en áreas agrícolas marginales. Es una planta suculenta de ruta fotosintética ácido crasuláceo que permite adaptarse a temperaturas extremas, salinidad, entre otros factores adversos (Torres-Ponce *et al.*, 2015). El sistema fotosintético especializado de estas plantas y características como la succulencia de sus tejidos, le da la capacidad de producir con mayor eficiencia materia fresca y seca por unidad de agua

consumida, superando a los pastos, leguminosas y otras plantas forrajeras (Inglese, 2018). Desde hace décadas el nopal es una alternativa forrajera, ya que ha desempeñado un rol importante para satisfacer la demanda de forraje en condiciones de sequía (Torres-Ponce 2015).

El cultivo del nopal forrajero requiere menos inversión, su rendimiento puede ser mayor que el de otras plantas en las zonas áridas y semiáridas, la productividad es al menos 60 veces mayor al de los pastos (Arba, 2020). El rendimiento de *Opuntia* se ha comparado con *Atriplex nummularia* Lindl.) y *Medicago sativa* L. por unidad de agua recibida, mostrando valores superiores (3001.00 kg/ha vs. 944.80 kg /ha y 367,40 kg/ha, respectivamente) (De Kock, 2001). La productividad de biomasa aérea (cladodios y frutos) de *O. ficus-indica* es mayor que la de *Agave americana* L. con aportes de agua ligeramente menores (10,3 Mg MS/ha/año con un aporte medio de agua de 407 mm/año vs. 9,3 Mg MS /ha/año con riego de 530 mm/año), esto demuestra el uso eficiente del agua (Neupane, *et al.*, 2021).

Las principales especies de nopal en la producción de forraje son *O. ficus-indica* Mill., *O. stricta* (Haw.) Haw., *O. lindheimeri* Engelm, *O. ellisiana*, *O. engelmannii* Salm Dyck, *O. chrysacantha* Berg, *O. amyclae*, *O. rastrera* Weber y *Nopalea cochenillifera* Salm Dyck. y el valor nutricional varía según la especie o variedad de nopal (Dubeux, *et al.*, 2021). Sin embargo, en promedio se indica que el contenido de materia orgánica es 84 %, la digestibilidad de la materia orgánica 78.9 %, la proteína cruda va de 4.1 % a 14 %, la fibra detergente neutro 23.8 %, la fibra detergente ácido 14.7 % y el contenido de materia seca 9.1 % (Guevara *et al.*, 2009, Fuentes, *et al.*, 2003).

El nopal alcanza una alta productividad siempre y cuando tenga la fertilización adecuada (Silva, 2012). Debido al corte constante y acarreo del nopal forrajero la extracción de nutrientes es alta y requiere de fertilización constante (Santos *et al.*, 1990). Además, la respuesta del nopal a la fertilización es mejor cuando se aplican nutrientes orgánicos que los minerales (Santos *et al.*, 1996). El uso de estiércol como fertilizante permite aumentar los niveles de nutrientes en el suelo, mejora la estructura y conductividad eléctrica, incrementa el contenido de materia orgánica y actividad microbiana. Estos beneficios han permitido que el estiércol sea utilizado por lo general en México de manera empírica sin ninguna referencia o base tecnológica, mientras que en otras regiones del mundo como en USA su uso es enfocado y regulado (Endelman, *et al.*, 2020). Aunque la diferencia más importante entre el

estiércol y el fertilizante químico es que el estiércol tiene un efecto benéfico en las propiedades físicas, biológicas y químicas del suelo (Del Pino *et al.*, 2008; Salazar *et al.*, 2007). Sin embargo, la dosis a aplicar debe ser calculada para evitar la contaminación por nitratos (NO_3) con base en el contenido de nitrógeno y en la demanda por este nutrimento por los cultivos a sembrar (Toth *et al.*, 2006). En este sentido, el nopal tiene una excelente respuesta a la aplicación del estiércol, debido a que se acelera el desarrollo vegetativo. La dosis para aplicar generalmente está limitada por la disponibilidad, el precio y costo de la aplicación del insumo. Se ha demostrado que este tipo de fertilizante induce un crecimiento más rápido, lo que incrementa la producción aun cuando la precipitación baja. Es recomendable que el abonado sea antes de plantar, debido a que se promueve el desarrollo vegetativo vigoroso, en donde la mínima cantidad que se recomienda aplicar es de 10 kg de estiércol seco por m^2 (Luna Vázquez *et al.*, 2012).

Por otro lado, el riego en el cultivo del nopal forrajero no es común, en algunas regiones áridas con precipitaciones menores a 300 mm y altas temperaturas nocturnas el crecimiento del nopal es limitado y en este caso la aplicación de riegos de auxilio ha propiciado la expansión del área cultivada de nopal (Inglese, 2018). Algunos autores han reportado que el uso del riego por goteo (10 mm al mes) da como resultado en rendimientos anuales de MS mayor a 19.6 ton/ha en regiones en donde no era posible el cultivo de nopal forrajero (Dubeaux *et al.*, 2015). El cultivo del nopal puede alcanzar alta productividad en agroecosistemas áridos de temporal con más de 50 ton de MS/ha al año. Esto en un sistema intensivo incluyendo altas dosis de estiércol de ganado ($80 \text{ ton/ha/año}^{-1}$) y alta densidad en población (160 mil plantas/ ha) (Silva, 2012). No obstante, la productividad promedio de pequeños sistemas es inferior debido a la escasa fertilización, densidades menores de plantación y ausencia de control de malezas (Inglese, 2018).

Una de las plagas que más afectan al nopal en el noreste de México es el gusano telarañero (*Loxomorpha flavidissimalis* Grote, 1878). Esta plaga se ha reportado en algunas plantaciones en los municipios de Victoria, Casas, Reynosa, Tula, entre otros en el estado de Tamaulipas. La temporada en la que se presenta es en primavera-verano, los picos de influencia se presentan cuando empieza la temporada de lluvia. El agente causal es una larva, que en sus primeras semanas de vida produce una telaraña que la protege de sus enemigos naturales para poder alimentarse (Lara-Villalón, *et al.*, 2016).

Otra especie de importancia es la cochinilla silvestre o grana (*Dactylopius opuntiae* Cockerell, 1896). La característica principal de esta plaga es que presenta pequeños puntos algodonosos de color blanco en la base de las espinas, y a medida que pasa el tiempo estas incrementan el número de individuos formando colonias. Cuando se les quita esta capa su cuerpo es de color rojo y cuando se aplastan producen un líquido viscoso color rojo carmín intenso. Esta plaga incrementa su severidad aumentando el número de colonias en el cladodio, incluso puede cubrirlo totalmente y hasta toda la planta (Díaz-Franco, *et al.*, 2014). La estrategia reproductiva de esta plaga le permiten colonizar rápidamente la planta, es por ello, que una vez que se encuentra en el cultivo se convierte en un insecto fitófago de alta importancia económica (López-Rodríguez, *et al.*, 2018). Se puede encontrar principalmente en los cladodios maduros, provoca clorosis, necrosis y malformaciones, además facilita la entrada de agentes infecciosos como bacterias y hongos fitopatógenos e incluso provoca la muerte de la planta con infestaciones severas (González, *et al.*, 2016). Para su control es recomendable aplicar caldo sulfocálcico y control químico con Malathión 1000 (Inglese, 2018). Es importante señalar que debido a los compuestos del caldo sulfocálcico (azufre y cal) el efecto toxico de este a los insectos y ácaros, se da por la reacción de los compuestos del producto aplicado sobre la planta con el agua y el gas carbónico, resultando en gas sulfhídrico y azufre coloidal (Abbot, 1945). Además, el uso del azufre en suelos con alta salinidad permite el lavado de sales y la reducción de su conductividad eléctrica, incrementando la capacidad natural de las plantas para absorber los nutrientes presentes en el suelo (Corrales-Maldonado *et al.*, 2014).

Lagomorfos (liebres y conejos); también pueden actuar como plagas al dañar o destruir completamente diferentes plantíos; en el caso de plantaciones de nopal solo se ha observado que se presenta en temporadas de estiaje en los meses de enero a abril. La severidad radica en que pueden consumir desde una pequeña parte hasta la totalidad del cladodio plantado, sobre todo los brotes tiernos. Se ha detectado que este problema solo se presenta en los primeros años de la plantación, a medida que estas crecen, el daño por los lagomorfos desaparece (Nájera- Castro, 2010).

En contraste, el crecimiento vegetal es un incremento irreversible en el tamaño de las plantas el cual se acompaña por cambios en la forma (Hunt, 2003). En términos biológicos la producción de un cultivo comienza a definirse a partir del inicio del ciclo de la obtención del

producto comercial o comestible y se ve afectada por múltiples factores propios del genotipo, abióticos y condiciones del manejo (Poorter *et al.*, 2014; Körner, 2015). Tales factores ejercen sus efectos a través de cambios en la diferenciación y expansión de los órganos, la captación de nutrientes y en la distribución de estos en los distintos órganos de la planta, los cuales modifican la producción de biomasa (Di Benedetto y Tognetti, 2016). Por tal, el aumento de materia seca es el parámetro más importante en el análisis cuantitativo del desarrollo de las plantas, ante ello es necesario el análisis del crecimiento de las plantas en términos de diferencia de especies que prospera en las mismas condiciones abióticas o diferencias que exista en una especie que se desarrolla en diferentes entornos (Pandey, 2017). Para evaluar tales variaciones en el genotipo influenciadas por las condiciones abióticas y como el manejo modifican la acumulación de biomasa, existen técnicas matemáticas desarrolladas en las primeras décadas del siglo XX (Di Benedetto y Tognetti, 2016). En donde el “análisis del crecimiento vegetal” parte de mediciones sencillas como lo es el área foliar y peso de los diferentes órganos (Hunt, 2003).

Di Benedetto y Tognetti (2016) señalan que evaluar el crecimiento brinda la oportunidad de contrastar la respuesta a modificaciones abióticas aéreas y radical. Los parámetros que se encuentren permitirán identificar cambios en las prácticas de manejo y dirección de los cultivos a través de los efectos que estos generan sobre los procesos fisiológicos asociados a la productividad a nivel de planta y cultivo.

2.2.1 Descripción de variedades

Opuntia ficus-indica son plantas de arbustivas a arborescentes, de 1.7 m de altura, con un tallo primario lignificado, bien definido. Tallo castaño oscuro, verde o gris, cilíndrico, de 45 cm de largo, a 20 cm de diámetro. Cladodios usualmente elípticos, pero también obovados, ovados, circulares, oblongos, oblanceolados o rómbicos 32-44 cm de largo en cladodios de dos a tres años, 18-25 cm de anchura, 1.8-2.3 cm de grosor, con un área de 462-796 cm, por lo general verde pálido (Reyes-Agüero *et al.*, 2005).

Respecto a las características morfológicas de las variedades en México, existe una amplia riqueza que ha sido producto de la domesticación, como resultado de cruzas intraespecíficas por selección artificial y propagación de los fenotipos deseados (Casas y Barbera 2002). La variedad Copena V-1, tiene la capacidad de producir brotes suculentos, carece de espinas, presenta un color verde-oscuro intenso, es suculenta de buen sabor, con poca acidez y baba,

sus brotes presentan resistencia a heladas en periodos de retorno largos en invierno (Vázquez-Vázquez *et al.*, 2007); es una planta del tipo arbustiva con cladodios de forma abobada de 32 a 42.2 cm de largo y de 18 a 22.5 cm, con un espesor de 13.77 a 29.93 mm de ancho sin ondulaciones en el margen (Bravo y Piña, 1979). Por otra parte, la variedad Villanueva, es originaria de Villanueva, Zacatecas; es una planta de aspecto arbustivo con cladodios de forma rómbica de 36 a 54 cm de largo y de 19 a 25 cm de ancho, con un grosor de 10.3 a 21.4 mm, presenta un color verde oscuro y una superficie cerosa muy poca expresada, sin ondulaciones en su margen (Barrón, 2004).

3. Hipótesis

Si las actividades antropogénicas son responsables de la fragmentación de los ecosistemas, entonces se espera que la actividad pecuaria sea la responsable del desgaste de los agostaderos en el Altiplano Tamaulipeco.

Si la producción de biomasa de *Opuntia ficus indica* es influenciada por la variedad y por la cantidad de nutrientes en el suelo, entonces se espera que la variedad Villanueva y con la aplicación máxima de estiércol (30 kg por m²) permitirá obtener el mayor rendimiento productivo.

4. Objetivo general

Conocer el estado actual del agostadero en el Altiplano Tamaulipeco y buscar la respuesta de dos variedades de nopal forrajero, así como la implementación de mejoras en el manejo del cultivo, usando prácticas de agricultura intensiva sustentable en Tula, Tamaulipas.

4.1 Objetivos específicos

Evaluar el estado actual del agostadero de acuerdo con distintas etapas temporales y con base en imágenes Landsat.

Delimitar las principales categorías de uso del suelo y cobertura de 1973, 1980, 1986, 2000, 2005, 2009, 2016 y 2020 en el Altiplano Tamaulipeco.

Calcular el porcentaje de área modificada o persistente para cada categoría entre las diferentes etapas temporales.

Plantear el tiempo de permanencia, sucesión o recuperación para el agostadero. Evaluar la producción de biomasa de dos variedades de *Opuntia ficus-indica* (Var. Villanueva y Var. Copena V1) sometidos a altas concentraciones de fertilización orgánica (estiércol ovino) bajo un sistema de riego por goteo.

5. Materiales y Métodos

5.1 Descripción del área de estudio

5.1.1 Evaluación del agostadero

El estado de Tamaulipas está integrado por 43 municipios agrupados en seis regiones, con características de índole geográfica, cultural y económica (INEGI 2014). La región **“Altiplano Tamaulipeco”** se conforma por cinco municipios Jaumave, Palmillas, Miquihuana, Bustamante y Tula. Se ubica al suroeste del estado, colinda al sur con el estado de San Luis Potosí y al norte y noroeste con Nuevo León y San Luis Potosí. Las escenas satelitales para el análisis del agostadero se seleccionaron en los ejidos San Rafael en Tula, El Llano y Anexas en Bustamante, La Peña en Miquihuana, San Antonio en Jaumave y San Vicente en Palmillas, estas localidades se seleccionaron de acuerdo con los Centros de Apoyo al Desarrollo Rural y el Distrito de Desarrollo Rural los cuales sugieren que, con base en los diagnósticos de extensionistas son los ejidos en donde existe mayor actividad pecuaria preferentemente caprina (Figura 1).

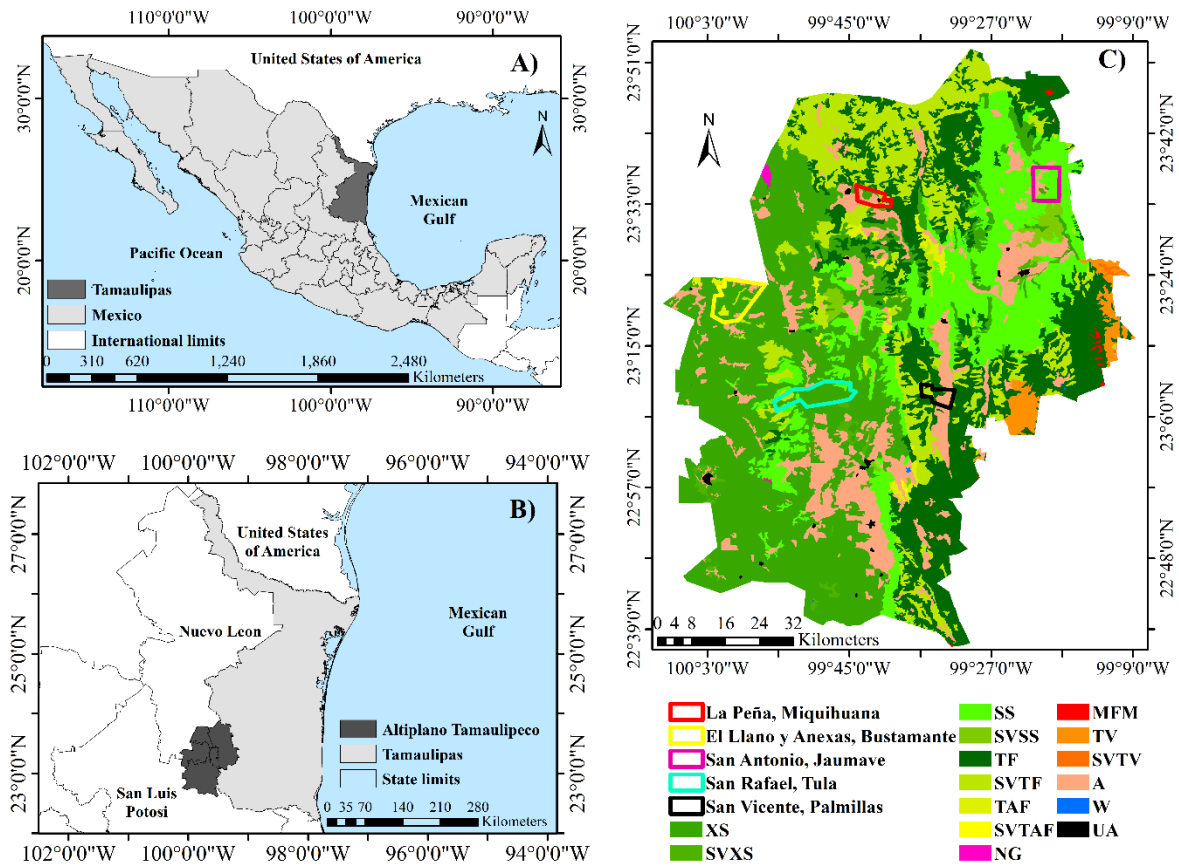


Figura 1. Localización del Altiplano Tamaulipeco (AT) en Tamaulipas, México.

A) Localización de Tamaulipas en el Noreste de México; B) posición geográfica del AT en el estado de Tamaulipas; C) AT con los ejidos de estudio y cobertura de suelo y vegetación (XS-Matorral xerófilo, SVXS-Vegetación secundaria de matorral xerófilo, SS-Matorral submontano, SVSS-Vegetación secundaria de matorral submontano, TF-Bosque templado, SVTF-Vegetación secundaria de bosque templado, TAF-Bosque de táscate, SVTAF-Vegetación secundaria de bosque de táscate, NG-Pastizal natural, MFM-Bosque mesófilo de montaña, TV-Vegetación tropical, SVTV- Vegetación secundaria de vegetación tropical, A-Agricultura, W-Agua y UA-Área urbana).

El AT ocupa una superficie de 8518 km², incrustado en la sierra madre oriental (58 %), su cobertura forma parte de la Reserva de la Biosfera “El Cielo” y el Área Natural Protegida “Altas Cumbres” en el municipio de Jaumave, el rango altitudinal varía entre 400 hasta los 3400 metros sobre el nivel del mar y también se encuentra una región hidrológica (INEGI 2000; INEGI-CONAGUA 2007). Predomina el clima árido-templado con temperaturas entre 12y 18°C, febrero es el mes más frío con temperaturas entre -3 y 18°C y el mes con mayor

temperatura es de 22°C. La precipitación del mes más seco es de 40 mm, los meses con mayor lluvia son de mayo a septiembre con precipitación máxima acumulada de 280 y 350 mm (43-55%) y el porcentaje de lluvia invernal es del 5% al 10% (García 2004). Las variaciones climáticas y su posición geográfica han dado lugar a 14 tipos de vegetación, incluyendo bosques templados (bosque de pino, bosque de encino, bosque de pino-encino y bosque de encino-pino), matorral xerófilo (matorral crasicaule, matorral desértico micrófilo y matorral desértico rosetófilo), matorral submontano, bosque de táscate, pastizal natural, pastizal halófilo, vegetación tropical (selva baja caducifolia y selva baja subcaducifolia) y bosque mesófilo de montaña (INEGI 2016; Treviño-Carreón y Valiente-Banuet 2005). Estas características han permitido la explotación extensiva (pastoreo extensivo) principalmente del ganado caprino en el AT, incluso es la región estatal con mayor potencial productivo, ya que el 96% del uso de suelo tiene potencial pecuario es para producción caprina (EPG 2022; INEGI 2017).

La producción caprina es una actividad agropecuaria de manutención para productores rurales de escasos recursos. Es la principal actividad económica pecuaria en áreas desérticas y semidesérticas (Pinos-Rodríguez *et al.*, 2015; Alejandre *et al.*, 2016). Tamaulipas cuenta con alrededor de 275,563 cabezas de ganado caprino (SIAP 2022), y en el 2012 el AT contaba con 72,942 caprinos (CSPCT 2012), de allí su importancia económica. Además, es considerado por su gran importancia biológica; origen de múltiples endemismos (Molina-Guerra 2019), centro de diversificación de familias botánicas como las Cactaceae, Crassulaceae y Agavaceae (Miranda 1955), parte de la ruta migratoria de la mariposa monarca (*Danaus plexippus*) (SEMARNAP y CONAMP 2018), y lugar de la distribución aislada de la guacamaya verde (*Ara militaris*) especie en peligro de extinción (NOM-059-SEMARNAT) (SEMARNAP y CONAMP 2012). En el ámbito social y cultural, Tula es un “Pueblo Mágico” por su arquitectura y por ser el pueblo más antiguo de Tamaulipas con más de 400 años, también cuenta con la denominación de origen para producir bebidas destiladas de Agave; Palmillas y Bustamante destacan por sus haciendas viejas y calles empedradas y Miquihuana se caracteriza por sus Bosques de pino-encino, con la mayor elevación de Tamaulipas (3,400 msnm) que da origen al clima frío y en temporada invernal la caída de nieve, por lo que representa un municipio de alta gama ecoturística (De la Cruz-Rock *et al.*, 2009; Jacques-Hernández 2009). Es importante resaltar que pese a ello el AT es la región

con mayor índice de pobreza que asciende a un 73% de sus habitantes (57,387); además, Bustamante y Miquihuana tienen un alto y muy alto grado de marginación, respectivamente, y se ubican entre los principales municipios con pobreza y marginación en México (INEGI 2022; DOF 2022).

5.1.2 Producción de biomasa

La investigación se desarrolló en dos predios de la localidad de 5 de mayo (Cebollitas): Réplica 1 en la latitud 23.003190 N y longitud -99.644390 W a 1283 msnm; réplica 2 en la latitud 23.004921 N y longitud -99.644068 a 1290 msnm en el municipio de Tula, Tamaulipas. Predomina el clima árido con temperaturas entre 12 y 18°C, febrero es el mes más frío con temperaturas entre -3 y 18°C y el mes con mayor temperatura es mayo con 38°C. La precipitación del mes más seco es de 40 mm, los meses con mayor lluvia son de mayo a septiembre con precipitación máxima acumulada de 280 y 350 mm (43-55%) y el porcentaje de lluvia invernal es del 5% al 10% (García 2004). De acuerdo con las pruebas de laboratorio el suelo cuenta con una textura del tipo franco arcilloso y con los rangos adecuados para el establecimiento del cultivo.

5.2. Evaluación del agostadero

5.2.1 Adquisición y pre-procesamiento de datos

De acuerdo con los Centros de Apoyo al Desarrollo Rural, el Distrito de Desarrollo Rural y diagnósticos de extensionistas, la actividad pecuaria predominante en el AT es la caprina. Un buen número de comunidades se dedican a esta actividad, por ejemplo, (1) el Ejido San Rafael en Tula, (2) El Llano y Anexas en Bustamante, (3) La Peña en Miquihuana, (4) San Antonio en Jaumave y (5) San Vicente en Palmillas. Estas cinco localidades se seleccionaron para los análisis de este estudio (Figura 1); para cada localidad se utilizaron escenas satelitales Landsat de ocho etapas temporales. Las escenas ortorectificadas de 1973, 1980, 1986, 2000, 2005 y 2009 se obtuvieron del proyecto Global Land Survey; estas se seleccionaron con base en resoluciones espaciales temporales, espectrales y radiométricas, las cuales representan un periodo sugerido para el análisis de cobertura terrestre y cambio (Gutman *et al.*, 2013) y se descargaron del sitio web Global Land Cover Facility (GLCF y GLS 2021); las escenas de 2016 y 2020 se obtuvieron como un conjunto de datos Landsat 8

OLI/TIRS C1 Nivel-1 del sitio web USGS Global Visualization Viewer (USGS 2020; GLOVIS 2021). En la medida de lo posible, se seleccionaron escenas del mismo periodo para minimizar el efecto de la estacionalidad en la vegetación. La delimitación de cada localidad en las escenas Landsat se realizó utilizando ENVI 5.0 (versión 5.0, Boulder, CO, EUA) (ENVI 2012). Se consideraron diferentes extensiones geográficas debido a que cada ejido ocupa un área de uso de suelo diferente, considerada “tierra comunal”: San Rafael con 126.8 km² (140,896 píxeles), San Antonio con 45.5 km² (50,496 píxeles), La Peña con 39.1 km² (43,512 píxeles), El Llano y Anexas con 118.5 km² (131,670 píxeles), y San Vicente con 42.28 km² (46,986 píxeles) (HCU 2022). Estas localidades representan las principales áreas de actividad ganadera y fueron seleccionadas de acuerdo a los diagnósticos de los extensionistas locales (García-Fernández y Domínguez-Jardines 2017). Las características de cada uno de los escenarios se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1. Características de las escenas Landsat y algunos parámetros utilizados para el análisis de cambios en la cobertura de los agostaderos y uso del suelo en el Altiplano Tamaulipeco, Tamaulipas, México.

Año	Satélite	Sensor	Ubicación de la coordinada (Ruta/Fila)	Fecha de la escena	Resolución espacial	Bandas para imagen en falso color	Bandas para extracción de firmas espectrales
1973	Landsat 1	MSS	029/044	10 Mayo 1973	60 m	1, 2, 3	1, 2, 3, 4, NDVI
1980	Landsat 1	MSS	029/044	9 Octubre 1980	60 m	1, 2, 3	1, 2, 3, 4, NDVI
1986	Landsat 5	TM	027/044	14 Marzo 1986	30 m	2, 3, 4	1, 2, 3, 4, 5, NDVI
2000	Landsat 7	ETM+	027/044	9 Diciembre 2000	30 m	2, 3, 4	1, 2, 3, 4, 5, NDVI
2005	Landsat 7	ETM+	027/044	5 Noviembre 2005	30 m	2, 3, 4	1, 2, 3, 4, 5, NDVI
2009	Landsat 8	ETM+	027/044	19 Julio 2009	30 m	2, 3, 4	1, 2, 3, 4, 5, NDVI
2016	Landsat 8	OLI-TIRS	027/044	1 Abril 2016	30 m	3, 4, 5	2, 3, 4, 5, 6, NDVI
2020	Landsat 8	OLI-TIRS	027/044	28 Abril 2020	30 m	3, 4, 5	2, 3, 4, 5, 6, NDVI

El método que se siguió para la evaluación de los cambios en el uso y cobertura del suelo (LULC) y la estimación del tiempo sucesional se detalla en investigaciones previas (Sánchez-Reyes *et al.*, 2017); se realizaron algunas modificaciones, como la elección de campos de entrenamiento en función de los tipos de vegetación y el número de escenas analizadas. Los procedimientos se resumen brevemente aquí. Primero, se utilizó una segmentación supervisada con un valor de tolerancia de similitud cero como parámetro inicial: los píxeles

de la imagen se agrupan automáticamente en función de las diferencias en sus características espectrales, por lo que los segmentos resultantes tienen un número variable de píxeles y una superposición mínima con respecto a otros segmentos (Eastman 2012); luego, se seleccionaron 30 segmentos como campos de entrenamiento para cada una de las categorías LULC. Estas categorías se establecieron con base en las descripciones de los conjuntos de datos vectoriales de uso del suelo y vegetación publicados por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) de México y descripciones recientes de los tipos de vegetación para el área de estudio (INEGI 1974; INEGI 1992; INEGI 1997; INEGI 2001; INEGI 2005; INEGI 2009; INEGI 2016; INEGI 2017; INEGI 2018 Treviño-Carreón y Valiente-Banuet 2005); en esta delimitación también se consideraron imágenes en falso color, imágenes de Google Earth y conocimiento de campo previo sobre las localidades. Se definieron nueve categorías LULC, aunque algunas diferían entre las cinco localidades debido a la composición de especies de plantas y la estructura entre los diferentes tipos de vegetación. Estas categorías son las siguientes: matorral xerófilo (SX), matorral submontano (SS), suelo desnudo (LB), agricultura (A), bosque de pino-encino (POF), vegetación arbustiva secundaria de bosque de pino-encino (SSVPOF) y bosque de táscate (TAF) (Tabla 2); solo dos de ellas, a saber, el matorral xerófilo y la vegetación arbustiva secundaria, se consideran agostaderos (ver más detalles en el análisis sucesional). Los campos de entrenamiento seleccionados para cada categoría se utilizaron para crear su firma espectral con las bandas Landsat correspondientes (Tabla 1). Posteriormente, se realizó un método de clasificación estricta utilizando el algoritmo de máxima verosimilitud (MAXLIKE) con el parámetro de mismas probabilidades para las firmas. MAXLIKE se distingue de otros algoritmos porque representa la intercorrelación entre bandas, incorpora información sobre la covarianza entre bandas y su varianza inherente, calcula la probabilidad posterior de pertenecer a cada clase, donde la probabilidad es mayor en la posición de la clase media, y disminuye en un patrón elíptico alejándose de la media (Eastman 2012). La descripción y cuantificación de las categorías LULC, y los patrones de cambio entre pares de años, se cuantificaron como área/porcentaje de extensión (km²) por separado para cada ubicación. Los procedimientos anteriores se ejecutaron en IDRISI Selva (versión 17.0, Worcester, MA, EE. UU.).

Tabla 2. Categorías de uso/cobertura del suelo (LULC) en el Altiplano Tamaulipeco, Tamaulipas, México.

Ejido	Category	Description
San Rafael (Tula), San Antonio (Jaumave), La Peña (Miquihuana) y El Llano y Anexas (Bustamante)	1. Matorral xerófilo	Matorral desértico micrófilo; matorral desértico rosetófilo; mezquital; y vegetación de matorral secundario.
San Rafael (Tula) and San Antonio (Jaumave)	2. Matorral submontano	Vegetación de matorral submontano denso.
San Rafael (Tula), San Antonio (Jaumave), La Peña (Miquihuana), San Vicente (Palmillas) y El Llano y Anexas (Bustamante)	3. Suelo desnudo	Áreas urbanas y semiurbanas; áreas con escasa vegetación; rocas; ríos secos y afluentes sin vegetación; áreas de suelo desnudo; y caminos y carreteras.
San Rafael (Tula), San Antonio (Jaumave), La Peña (Miquihuana), San Vicente (Palmillas) y El Llano y Anexas (Bustamante)	4. Agricultura	Agricultura anual, semipermanente y permanente de secano; y pastizales inducidos.
La Peña (Miquihuana) y San Vicente (Palmillas)	5. Bosque de pino-encino	Vegetación densa de pinares, encinares, pino-encino y encino-pino.
San Vicente (Palmillas)	6. Vegetación arbustiva secundaria de bosques de pino-encino	Vegetación secundaria de porte arbustivo de bosques de pino-encino.
El Llano y Anexas (Bustamante)	7. Bosque de táscate	Vegetación densa de árboles coníferos (hojas en forma de escamas) del género <i>Juniperus</i> .

5.2.2. Análisis de la sucesión

Como se indicó anteriormente, se utilizó un método previamente establecido (Sánchez-Reyes *et al.*, 2017) para determinar el tiempo sucesional aproximado con base en una tabulación cruzada, vinculando la imagen transicional de cada par de años con el año siguiente y repitiendo el proceso hasta completar todas las etapas temporales (Figura 2); este proceso se describe brevemente aquí. Como primer paso, las categorías LULC en cada imagen se reclasificaron en solo tres categorías: “actividades antropogénicas” (Tabla 2, categorías 3 y 4), “agostadero” (Tabla 2, categorías 1 y 6), y una tercera que era “matorral submontano”, “bosque de pino-encino” o “bosque de táscate”, dependiendo de la localidad analizada (Tabla 2, categorías 2, 5 y 7). Estas tres categorías simplificadas se utilizaron para tener un análisis más preciso y comprensible. El matorral xerófilo y la vegetación secundaria de bosques de pino y encino fueron considerados como agostaderos ya que se sabe que los habitantes

utilizan con mayor frecuencia estas áreas para el pastoreo de ganado debido a la abundancia y disponibilidad de forraje (Cervantes 2002). Esto dio como resultado nuevas imágenes reclasificadas, denominadas aquí como “Imágenes simplificadas” (Figura 2).

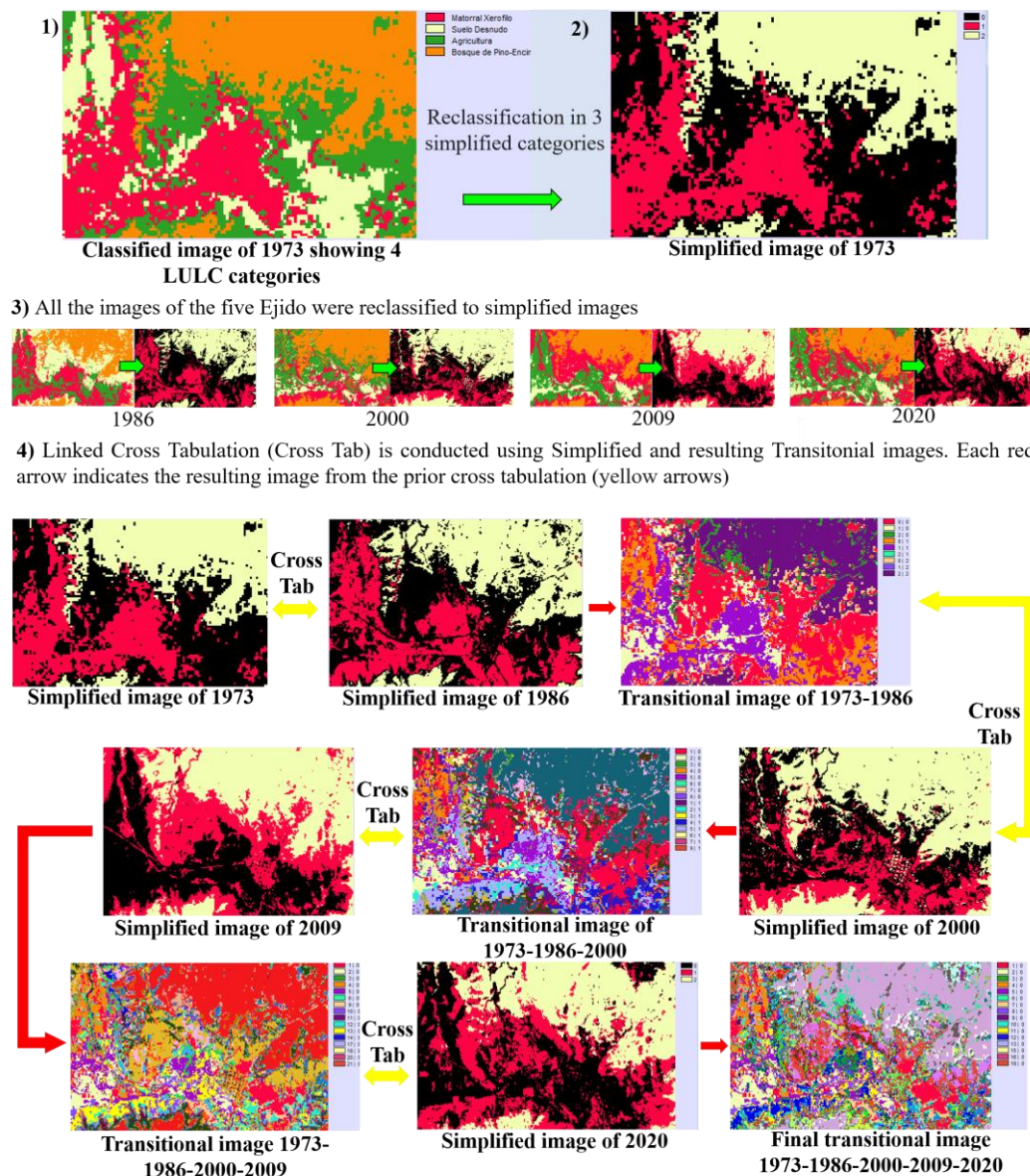


Figura 2. Resumen del proceso para la delimitación de categorías sucesionales.

(1) La primera imagen LULC clasificada por MAXLIKE (2) se reclasifica en tres categorías simplificadas: 0 (categoría simplificada de actividades antropogénicas), 1 (agostadero) y 2 (matorral submontano, bosque de pino-encino o bosque de táscate, según la más adecuada para cada Ejido). (3) Otras imágenes LULC se reclasifican de la misma manera. (4) Se realiza una tabulación cruzada, comparando la imagen simplificada de 1973 con la de 1986, lo que

da como resultado una imagen de transición de cambio para 1973-1986 con nueve categorías. Esta se compara con la siguiente imagen simplificada (2000), lo que da como resultado una nueva imagen de transición. El proceso continúa hasta obtener una imagen de transición final, de 1973-2020.

Para el siguiente paso, se consideraron únicamente las imágenes simplificadas de 1973, 1986, 2000, 2009 y 2020. Estas se utilizaron para realizar el análisis de tabulación cruzada, comparando la imagen de 1973 con la de 1986, dando como resultado una imagen de transición de los cambios entre los dos años. Este nuevo archivo se comparó con la imagen simplificada del año 2000, dando como resultado una nueva imagen de transición. El procedimiento se repitió hasta vincular todas las etapas temporales (Figura 2), lo que originó una imagen de transición final (Figura 2) con un número variable de categorías totales, ya que los patrones de cambio fueron diferentes entre localidades (Tabla 3).

Tabla 3. Número de categorías resultantes de la “imagen de transición” para cada Ejido del Altiplano Tamaulipeco, Tamaulipas, México.

Ejido	1973 vs. 1986	1973–1986 vs. 2000	1973–1986– 2000 vs. 2009	1973–1986–2000– 2009 vs. 2020
1. El Llano y Anexas-Bustamante	9	27	80	222
2. San Antonio-Jaumave	9	27	77	193
3. San Vicente-Palmillas	9	27	75	188
4. La Peña-Miquihuana	9	25	65	148
5. San Rafael-Tula	9	26	64	130

La imagen de transición final de cada localidad se reclasificó en solo nueve categorías de sucesión en función de la persistencia o transición de las categorías LULC. Los criterios para la designación de categorías sucesionales después de la reclasificación se describen a continuación:

- Categoría 1. Perturbación constante: áreas donde las actividades antropogénicas persistieron y se mantuvieron sin cambios durante cada una de las cinco etapas temporales hasta 2020.
- Categoría 2. Actualmente modificada: áreas sin perturbación permanente, pero con presencia de actividades antropogénicas en 2020.
- Categoría 3. Agostadero constante: áreas de agostadero que permanecieron inalteradas durante las cinco etapas hasta 2020.

- Categoría 4. Agostadero—47 años de sucesión: áreas que fueron perturbadas en 1973 pero que mostraron vegetación de agostadero en 1986 y persistieron hasta 2020.
- Categoría 5. Agostadero—34 años de sucesión: áreas que fueron perturbadas en 1986 pero que mostraron vegetación de agostadero en 2000 y persistieron hasta 2020.
- Categoría 6. Agostadero - 20 años de sucesión: áreas que fueron perturbadas en 2000 pero que mostraron vegetación de agostadero en 2009 y persistieron hasta 2020.
- Categoría 7. Agostadero - 11 años de sucesión: áreas que fueron perturbadas en 2009 pero que mostraron vegetación de agostadero en 2020.
- Categoría 8: Área de transición a agostadero: áreas de matorral submontano, bosque de pino-encino o bosque táscate en 2009 que cambiaron a agostadero en 2020.
- Categoría 9: Matorral submontano/bosque de pino-encino/bosque de táscate: cualquier área de estas tres categorías que estuviera presente en 2020.

Para cada categoría se calcularon los valores de área (km²) y los porcentajes. Todos los procedimientos anteriores se realizaron utilizando IDRISI Selva (versión 17.0, Worcester, MA, EE. UU.). Los mapas de cobertura terrestre y sucesión se generaron en ArcGIS (versión 10.9, Redlands, CA, EE. UU.) (Esri 2013).

5.3 Producción de biomasa

5.3.1 Características del suelo

El experimento se estableció en un suelo franco arcilloso. A los primeros 30 centímetros de profundidad presenta una capacidad de campo de 30%, el punto de marchitamiento es de 16% y la humedad disponible del 14%. La conductividad eléctrica es de 2.96 ms/cm y un pH de 7.9 (Figura 3). Estas características edáficas y de msnm permiten la adaptación del cultivo de nopal al área de estudio.

LABORATORIO DE INVESTIGACIÓN Y DIAGNÓSTICO AGRÍCOLA

C.U. Adolfo López Mateos, C.P. 87149, Tel. (834) 316 17 16 y 316 16 00 Ext. 2154, 2165
Cd. Victoria Tam.

RESULTADOS DE ANÁLISIS DE SUELO

DATOS

Propietario	Sr. Lucas Hernández Hernández
Fecha	27 de mayo del 2021
Localización	Ejido 5 de mayo, Tula, Tamaulipas
Cultivo	Maíz
Tipo de riego	Temporal

RESULTADOS

No. de registro 7267 Profundidad (0-30cm)	Método		Rango adecuado
Textura	Bouyoucos	Franco Arcilloso	
Partículas de tamaño arcilla (%)		30.0	
Partículas de tamaño limo (%)		41.4	
Partículas de tamaño arena (%)		28.6	
pH (1:2)	Potenciometría	7.9	6.0 a 8.4
Conductividad eléctrica (mS/cm)	Extracto de saturación	2.96	0 a 4
Relación de adsorción de sodio	Extracto de saturación	4.22	0.1 a 5.0
Materia orgánica (%)	Walkley-Black	4.70	Más de 3.0
Nitrógeno total (%)	A partir de materia O.	0.28	Más de 0.2
Fósforo extractable (mg/kg)	Olsen	55.5	Más de 7.0
Potasio intercambiable (meq/100g)	Acetato de amonio	2.76	Más de 0.7
Hierro extractable (mg/kg)	DTPA-EAA	6.58	Más de 4.5
Zinc extractable (mg/kg)	DTPA-EAA	2.98	Más de 1.0
Carbonatos totales (%)	Titulación ácido-base	36.5	10 a 20

Figura 3. Análisis de suelo en parcela de la localidad 5 de mayo (Cebollitas), Tula, Tamaulipas.

5.3.2 Preparación del terreno

Para la preparación del suelo se realizó un barbecho y un paso de rastra. Se aplicó la dosis de estiércol para cada experimento y se incorporó al suelo con el paso de rastra de manera perpendicular al primero. Se realizó un análisis químico del estiércol de ganado ovino, el cual contiene los siguientes elementos (%); materia orgánica 42.9, materia mineral 57.1, nitrógeno total 0.88, fósforo extractable (mg/kg), 150.0, potasio intercambiable (meq/100g) 22.3, hierro extractable (mg/kg) 21.9, zinc extractable (mg/kg) 15.1 y carbonatos totales (%) 21.9 (Figura 4).

LABORATORIO DE INVESTIGACIÓN Y DIAGNÓSTICO AGRÍCOLA

C.U. Adolfo López Mateos, C.P. 87149, Tel. (834) 315 17 15 y 315 15 00 Ext. 2154, 2165
Cd. Victoria Tam.

RESULTADOS DE ANÁLISIS DE ESTIERCOL OVINO

DATOS

Propietario	Lucas Hernández Hernández
Fecha	27 de mayo de 2021
Localización	Ejido 5 de mayo, Tula, Tamaulipas

RESULTADOS

No. de registro 7268	Método		Rango adecuado en suelo
pH (suspensión estiércol:agua 1:2)	Potenciometría	8.7	6.0 a 8.4
Conductividad eléctrica (mS/cm)	Extracto de saturación	9.72	0 a 4
Relación de adsorción de sodio (RAS)	Extracto de saturación	23.1	0.1 a 5.0
Materia Orgánica (%)	Incineración	42.9	Más de 3.0
Materia mineral (%)	Por diferencia con MO	57.1	
Nitrógeno total (%) I	Kjeldhal	0.88	Más de 0.18
Fósforo extractable (mg/kg)	Olsen	150.0	Más de 7.0
Potasio intercambiable (meq/100g)	Acetato de amonio	22.3	Más de 0.7
Hierro extractable (mg/kg)	DTPA-EAA	21.9	Más de 4.5
Zinc extractable (mg/kg)	DTPA-EAA	15.1	Más de 1.0
Carbonatos totales (%)	Titulación ácido-base	21.9	10 a 20

Figura 4. Análisis de fertilizante usado en los experimentos.

5.3.3 Establecimiento del experimento

Los tratamientos evaluados son:

1. Copena V1 con una densidad de plantación de 12 plantas por metro cuadrado, 3 niveles de aplicación de fertilizante (0, 20 y 35 kg de estiércol).
2. Villanueva; 8 plantas por metro cuadrado, 3 niveles de aplicación de fertilizante (0, 20 y 35 kg de estiércol).

El diseño de la parcela fue con bloques cuya área muestral fue de 1 m² (1.2 m por 0.80 m) con 6 repeticiones establecidas en una cama (Figura 5). Es importante señalar que se realizaron 2 réplicas del experimento (Figura 6).

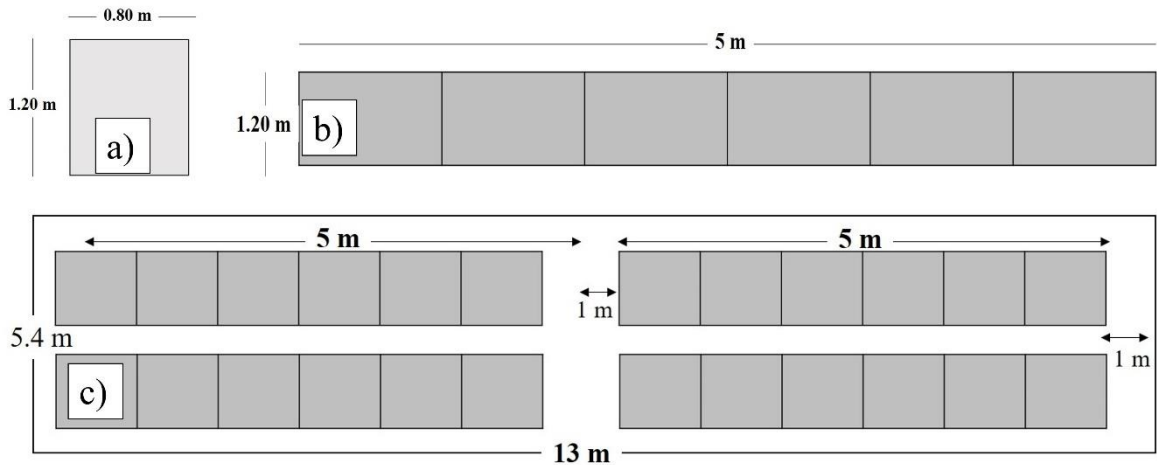


Figura 5. Diseño experimental. a) área muestral b) cama diseñada para el establecimiento del experimento y sus repeticiones c) modelo del experimento en la parcela

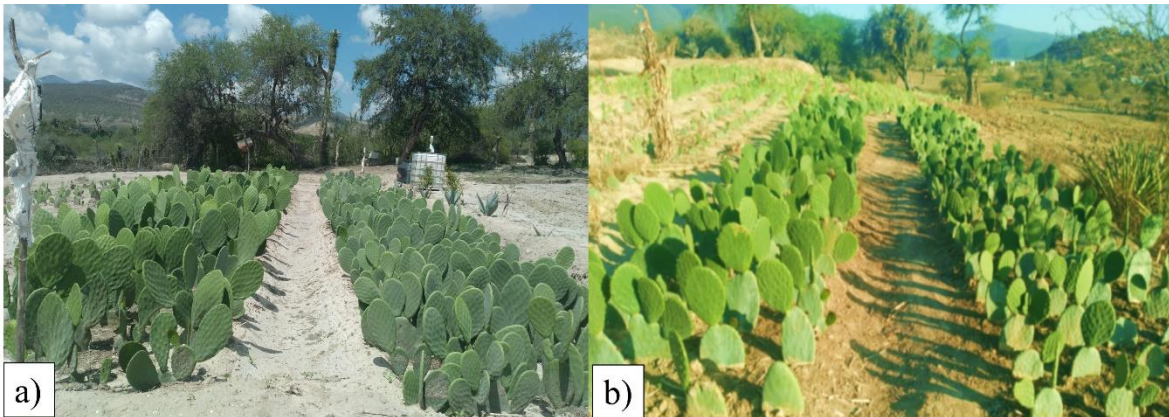


Figura 6. Experimentos establecidos a) réplica 1 b) réplica 2

Material vegetativo: Se utilizaron plantas madre de la localidad Altos de Caballeros en el municipio de Victoria, Tamaulipas (Copena V1 y Villanueva). Los cladodios se trataron con caldo bordelés (0.5 kg de sulfato de cobre y 1.5 kg de cal en 10 L de agua) esto con la finalidad de prevenir la pérdida de planta por infección de bacterias, hongos u otros (Figura 7). Se dejaron reposar a la sombra por 15 días antes de ser plantados, esto para que las heridas cicatricen (Vázquez, 2006). Estas plantas se propagan por reproducción asexual de manera clonal y lo que se hizo es colocar un cladodio en suelo seco.



Figura 7. Material vegetativo usado en experimento. a) Plantas madre en parcela b) *Opuntia ficus-indica* Var. Villanueva c) *Opuntia ficus-indica* Var. Copena-V1 d) cladodios con tratamiento antes de su plantación.

Riego: Se utilizó el sistema de riego por goteo superficial. La cintilla empleada fue la ORO AQUA-TRAXX, calibre 6 mil (5/8) con flujo de 1.01 L por hora, con una separación de goteros de 0.20 m. Se colocaron dos líneas regantes entre las tres hileras de nopal, por lo que en cada parcela experimental se establecieron 10 goteros. Se aplicaron tres láminas de riego cada 15 días.

5.3.4 Toma de datos morfológicos

El establecimiento del experimento se realizó en septiembre del 2021. Los datos se empezaron a tomar a partir del año 2023 cuando el cladodio tenía entre los 50 y 70 días de haber brotado. A cada individuo se le registró estación del año, número de cladodios, y número de cladodios por metro cuadrado; a cada cladodio se le registró el largo, ancho, espesor de cladodio, área foliar (área en cm^2) peso fresco y peso seco (Figura 8). Para la toma de datos se generaron puntos al azar dentro de cada parcela, empleando la extensión “RANDOM POINTS” (www.jennessent.com) para el programa ArcView 3.2 (ESRI, 1983) con el objetivo de eliminar el sesgo debido a las preferencias individuales en la elección de

los individuos a evaluar, de acuerdo con el tamaño de muestra se tomaron datos de 10 plantas por tratamiento evaluado. La toma de datos se realizó en el segundo mes de iniciada cada estación del año y se llevó a cabo durante un año (invierno-primavera-verano y otoño).



Figura 8. Toma de datos morfológicos en experimento

5.3.5 Análisis estadístico

Con la finalidad de conocer la producción de biomasa (fresca y seca) se utilizó la estadística descriptiva. Con el apoyo de tablas dinámicas en el paquete de Excel se obtuvieron promedios para cada una de las variables analizadas. Para conocer las diferencias significativas entre los tratamientos evaluados se aplicó estadística multivariada, mediante el análisis de funciones discriminantes; este análisis permitió estimar diferencias estadísticamente significativas entre los grupos generados a partir de los tratamientos, en donde la variable agrupadora se formó de la siguiente manera; variedad, densidad, cantidad de aplicación de fertilizante y estación del año (Tabla 4 y Tabla 5).

Tabla 4. Elementos para formación de variable categórica

Variedad	Densidad	Cantidad de fertilizante	Estación del año
Copena=C	12	00	Invierno=I
Villanueva=V	08	20	Primavera=P
		35	Verano=V
			Otoño=O

Tabla 5. Variables categóricas formadas

Variables Categóricas		
C1200I	C1220I	C1235I

C1200P	C1220P	C1235P
C1200V	C1220V	C1235V
C1200O	C1220O	C1235O
V0800I	V0820I	V0835I
V0800P	V0820P	V0835P
V0800V	V0820V	V0835V
V0800O	V0820O	V0835O

Por lo que el significado de las siglas será la siguiente

C1200I= Copena V1, 12 plantas/m², 00 sin fertilizante, Invierno; **C1220I**= Copena V1, 12 plantas/m², 20 kg de fertilizante, Invierno; **C1235I**= Copena V1, 12 plantas/m², 35 kg de fertilizante, Invierno; **C1200P**= Copena V1, 12 plantas/m², 00 sin fertilizante, Primavera; **C1220P**= Copena V1, 12 plantas/m², 20 kg de fertilizante, Primavera; **C1235P**= Copena V1, 12 plantas/m², 35 kg de fertilizante, Primavera; **C1200V**= Copena V1, 12 plantas/m², 00 sin fertilizante, Verano; **C1220V**= Copena V1, 12 plantas/m², 20 kg de fertilizante, Verano; **C1235V**= Copena V1, 12 plantas/m², 35 kg de fertilizante, Verano; **C1200O**= Copena V1, 12 plantas/m², 00 sin fertilizante, Otoño; **C1220O**= Copena V1, 12 plantas/m², 20 kg de fertilizante, Otoño; **C1235O**= Copena V1, 12 plantas/m², 35 kg de fertilizante, Otoño; **V0800I**= Villanueva, 08 plantas/m², 00 sin fertilizante, Invierno; **V0820I**= Villanueva, 08 plantas/m², 20 kg de fertilizante, Invierno; **V0835I**= Villanueva, 08 plantas/m², 35 kg de fertilizante, Invierno; **V0800P**= Villanueva, 08 plantas/m², 00 sin fertilizante, Primavera; **V0820P**= Villanueva, 08 plantas/m², 20 kg de fertilizante, Primavera; **V0835P**= Villanueva, 08 plantas/m², 35 kg de fertilizante, Primavera; **V0800V**= Villanueva, 08 plantas/m², 00 sin fertilizante, Verano; **V0820V**= Villanueva, 08 plantas/m², 20 kg de fertilizante, Verano; **V0835V**= Villanueva, 08 plantas/m², 35 kg de fertilizante, Verano; **V0800O**= Villanueva, 08 plantas/m², 00 sin fertilizante, Otoño; **V0820O**= Villanueva, 08 plantas/m², 20 kg de fertilizante, Otoño; **V0835O**= Villanueva, 08 plantas/m², 35 kg de fertilizante, Otoño.

Este método permitió encontrar diferencias globales entre los grupos, estimó las diferencias entre estos e identificó a la variable que aporta mayor variación entre los grupos. Lo anterior se realiza a través de la búsqueda de la mejor combinación lineal de las variables originales, lo que origina nuevas variables conocidas como funciones discriminantes o raíces.

A partir del modelo generado se puede predecir en qué grupo potencialmente puede encontrarse un objeto no considerado en el análisis. La interpretación de este análisis se realizó tomando en cuenta las dos primeras raíces significativas, ya que son las que representan la mejor discriminación en los grupos (Rencher 2002). El valor de Lambda de Wilks obtenido, es una medida de las desviaciones dentro de cada grupo respecto a las desviaciones totales. Toma valores entre 0 y 1; los valores cercanos a 0 indican una alta capacidad discriminante de las variables; mientras que valores cercanos a 1, indican una baja capacidad de discriminación (Pozo-Díaz y Carrasco 2005). Mediante el análisis de funciones discriminantes también fue posible determinar los valores de F y p en la comparación de las

categorías por pares y ver las diferencias significativas en las categorías de producción de biomasa en función de las variables morfológicas (Rencher 2002). El análisis de funciones discriminantes se realizó utilizando STATISTICA 8.0 (StatSoft Inc 2007).

6. Resultados

6.1 Evaluación del agostadero

6.1.1 Cambios en el uso del suelo y la cobertura vegetal en San Rafael, Tula, Tamaulipas

La cobertura del suelo en 1973 estaba constituida por 42 km² de actividades antropogénicas (33%), 53 km² de agostadero (42%) y 32 km² de matorral submontano (25%). Para el año 2020, los cambios fueron notorios, pues se obtuvieron altos porcentajes de transición de actividades antropogénicas (9 km², 7%) y matorral submontano (20 km², 15%) a agostadero, los cuales ocuparon 81 km² (64%) del área total de 127 km² (Figura 9 y Figura 10).

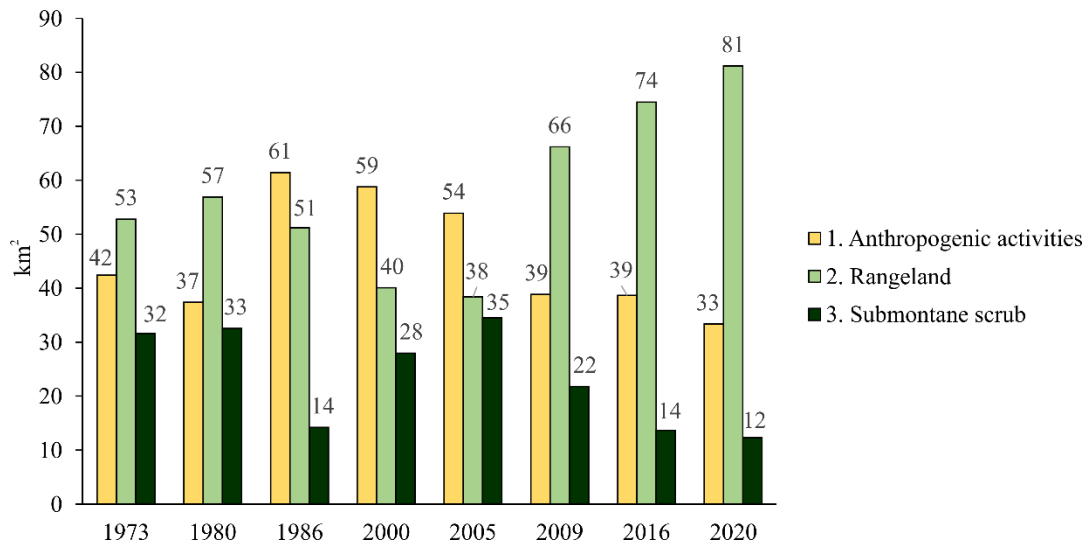


Figura 9. Cobertura y cambios de uso del suelo en el periodo de estudio, San Rafael, Tula, Tamaulipas, México.

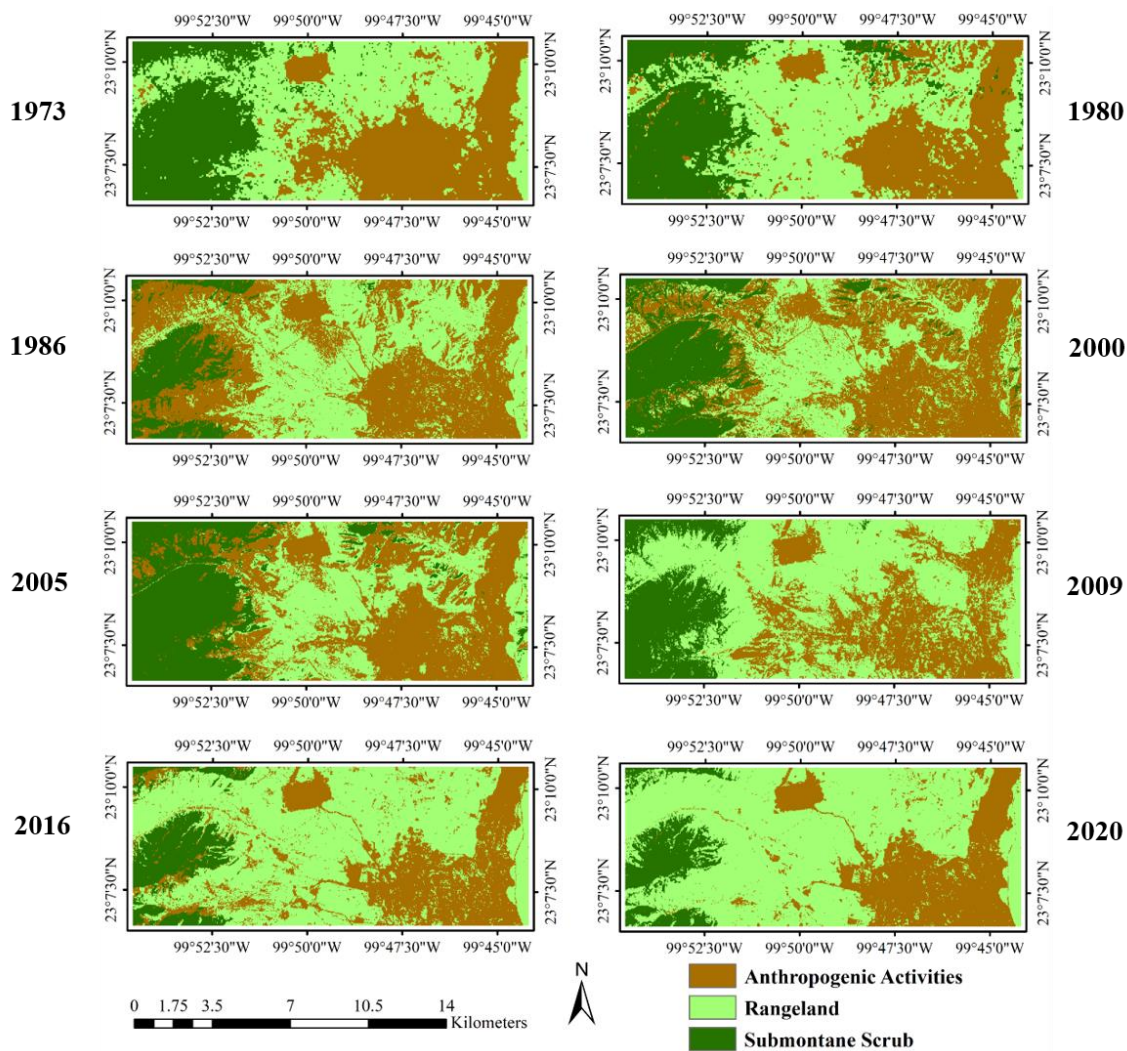


Figura 10. Cobertura de uso de suelo en 1973, 1980, 1986, 2000, 2005, 2009, 2016 y 2020, San Rafael, Tula, Tamaulipas, México.

El análisis del cambio de USLC entre cada par de años mostró un aumento en el área de agostadero, el cual se mantuvo constante de 2009 a 2020. Asimismo, se observa que el área de agostadero aumentó su porcentaje de cobertura a 52% de 2005-2009, lo que representa una cobertura de 82 km² (Figura 11 e). Sin embargo, 10% de las áreas de agostadero mostraron una transición hacia actividades antrópicas (9%) y matorral submontano (1%) de 2000 a 2005 (Figura 11 d).

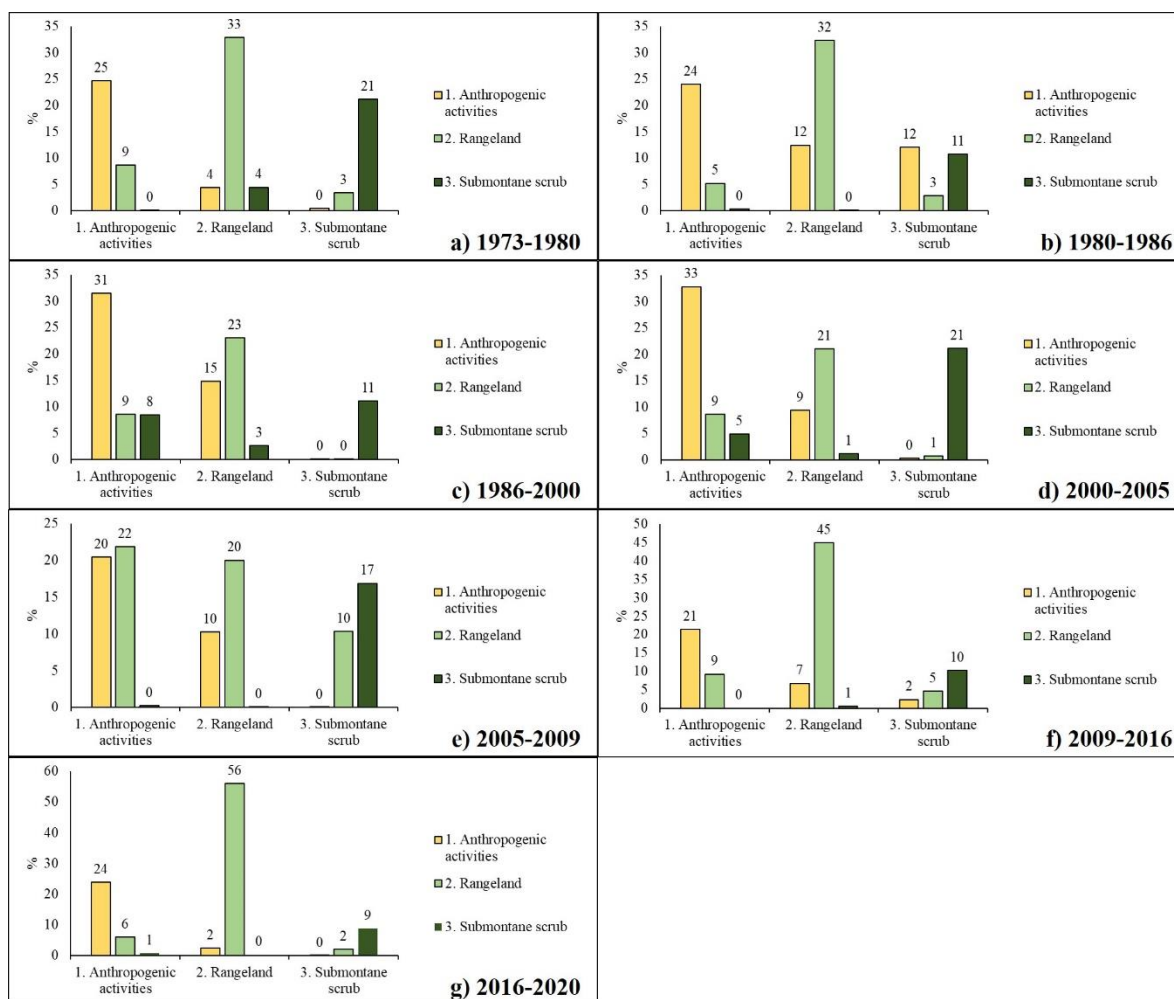


Figura 11. Porcentaje de cambios en la cobertura del suelo en las escenas de (a) 1973-1980, (b) 1980-1986, (c) 1986-2000, (d) 2000-2005, (e) 2005-2009, (f) 2009-2016, y (g) 2016-2020, San Rafael, Tula, Tamaulipas, México.

La categoría de sucesión actual con mayor cobertura (27 km^2) en el municipio de Tula fue el agostadero de recuperación de 20 años, cubriendo 54% del área total (Figura 12). Solamente 12.8 km^2 permanecen como agostaderos constantes y 18.7 km^2 de matorral submontano fueron convertidos a agostaderos; estas áreas de transición aumentaron de este a oeste, principalmente lejos de las actividades antropogénicas (Figura 13). Por otro lado, el disturbio constante persistió a partir de 1973 en 19.9 km^2 , y fue geográficamente cercano al constante (Figura 13), mientras que el matorral submontano representó 12.3 km^2 (Figura 12).

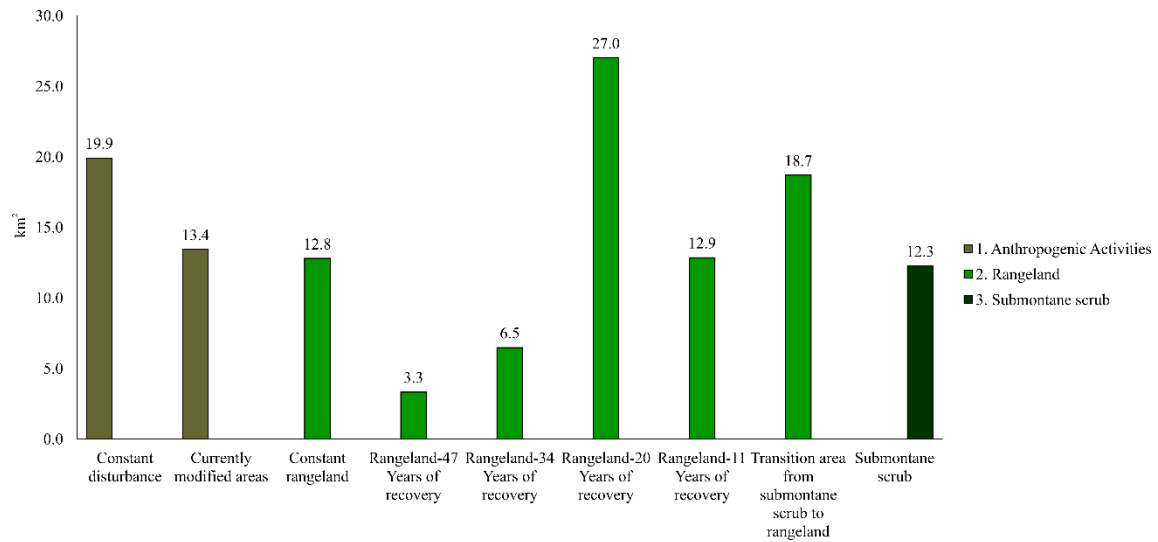


Figura 12. Área representada (km²) para cada categoría de uso de suelo durante el periodo de estudio, San Rafael, Tula, Tamaulipas, México.

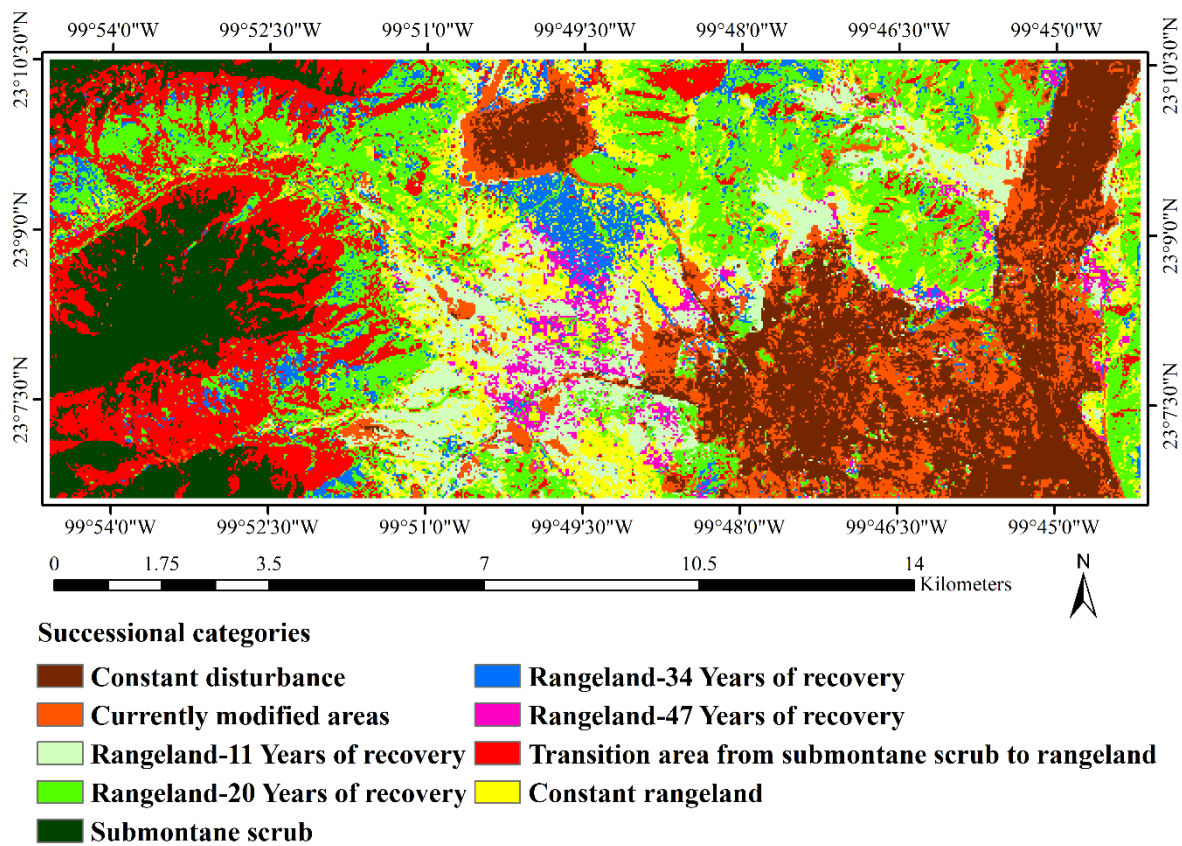


Figura 13. Categorías sucesionales de cobertura y cambio de uso de suelo, San Rafael, Tula, Tamaulipas, México.

6.1.2 Cambios en el uso del suelo y la cobertura vegetal en San Antonio, Jaumave, Tamaulipas.

La cobertura total de uso del suelo para actividades antrópicas en 1973 fue de 18 km² (39,60%), 19 km² (41,73%) para agostadero y 8 km² (18,66%) para matorrales submontano. Después de 47 años, las actividades antrópicas disminuyeron a 21,40% (10 km²), los agostaderos aumentaron su cobertura a 60,09% (27 km²), y el matorral submontano mantuvo una superficie de cobertura similar (8 km², 18,49%) (Figura 14 y Figura 15).

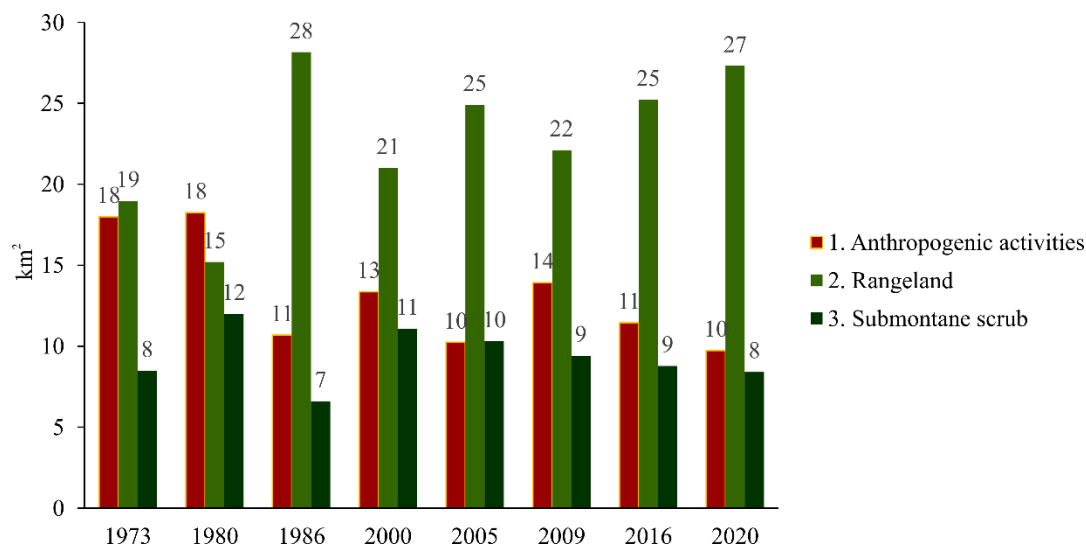


Figura 14. Cobertura y cambios de uso del suelo en el periodo de estudio, San Antonio, Jaumave, Tamaulipas, México.

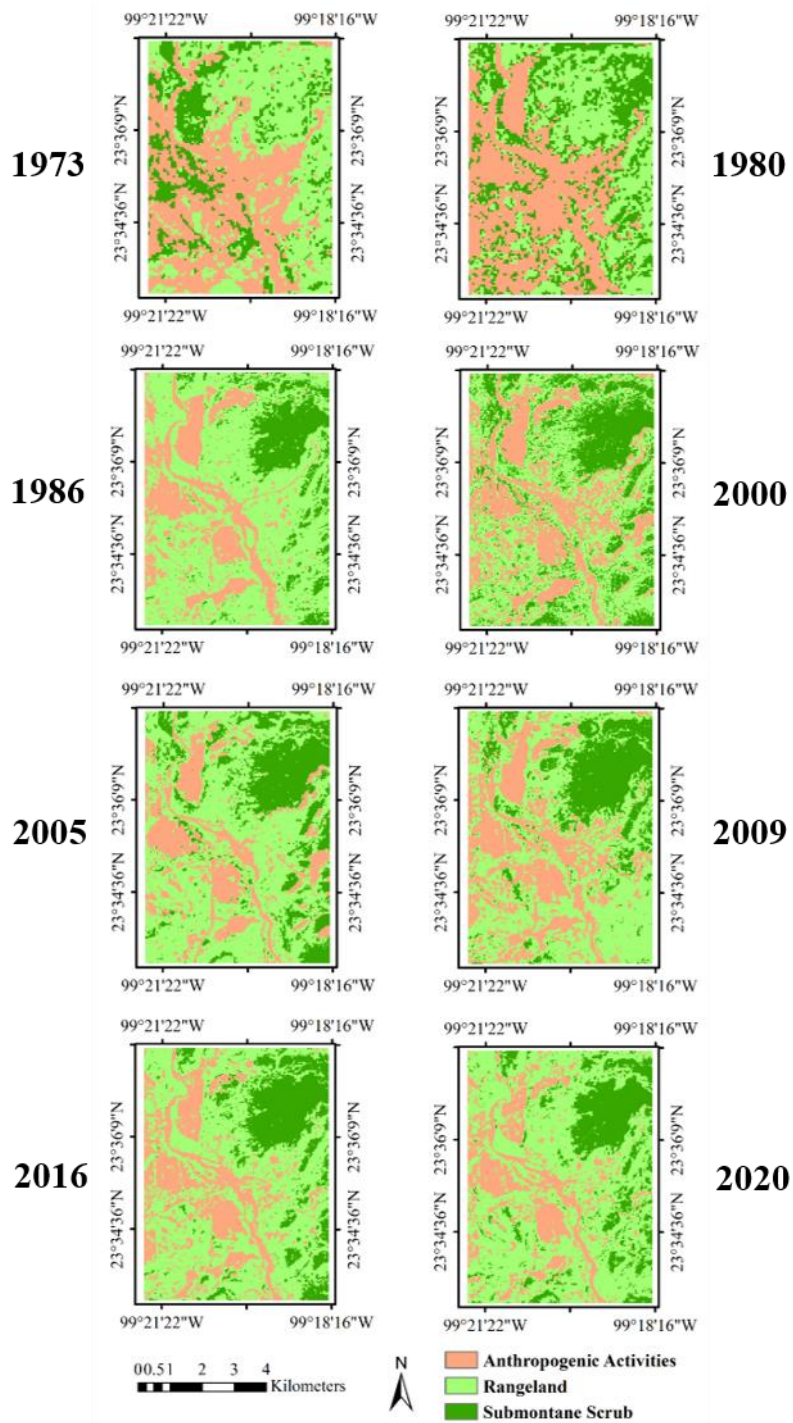


Figura 15. Cobertura de uso de suelo en 1973, 1980, 1986, 2000, 2005, 2009, 2016 y 2020, San Antonio, Jaumave, Tamaulipas, México.

La mayor contribución al porcentaje de cambios se presentó en la comparación de 1980-1986 (Figura 16 b): solo 22% del agostadero persistió hasta 1986, mientras que 20% cambió a actividades antrópicas y 19% a matorral submontano; ambos ocuparon 61% de la cobertura

total de ese año (45.4 km²). De esta comparación de escenarios, el agostadero perdió 8% en los escenarios 2016-2020 vs., 2009-2016 (Figura 16 g), el cual fue desplazado por actividades antrópicas y matorral submontano (4%).

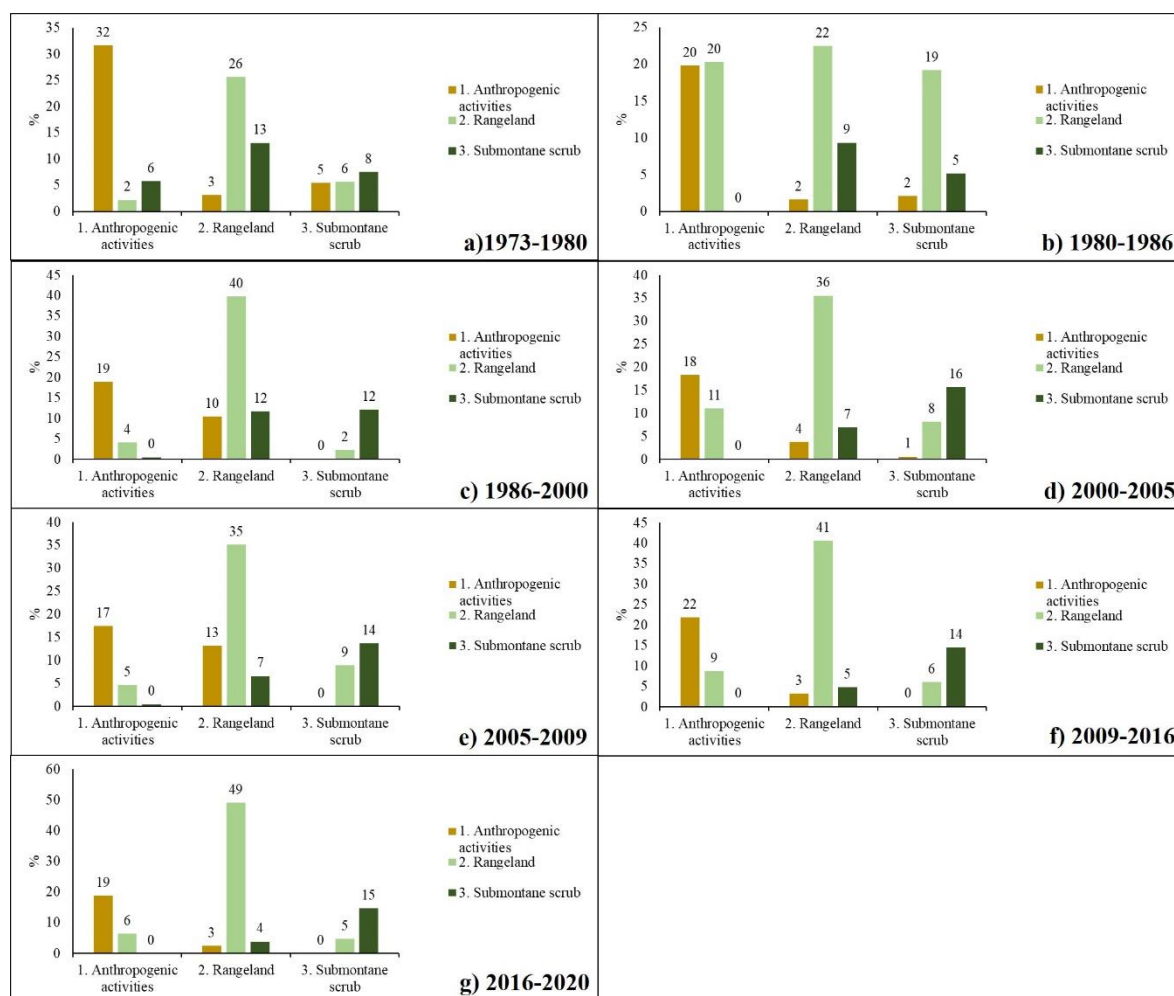


Figura 16. Porcentaje de cambio de cobertura terrestre en escenas de (a) 1973–1980, (b) 1980–1986, (c) 1986–2000, (d) 2000–2005, (e) 2005–2009, (f) 2009–2016, y (g) 2016–2020, San Antonio, Jaumave, Tamaulipas, México.

Las categorías sucesionales con mayor área de recuperación de agostaderos fueron las de 11 y 47 años, con 5.4 y 4.9 km² de extensión, respectivamente. En total, la cobertura en estado de recuperación representó 13.1 km² (29.11%), mientras que 5.1 km² (11.33%) fue agostadero constante, y 20.44% (9.2 km²) cambió de matorral submontano a agostadero (Figura 17); por tanto, la mayor parte del polígono mostró una distribución irregular, sugiriendo una marcada rotación nula del agostadero (Figura 18). Hasta el año 2020, 8.88%

(4.0 km²) de la cobertura permaneció con perturbación constante, y 5.8 km² (12.88%) fue modificada por actividades antrópicas; La vegetación de matorral submontano representó el 18,66% (8,4 km²) (Figura 17) y ocupó áreas aisladas con la mayor parte de su distribución al noreste del polígono (Figura 18).

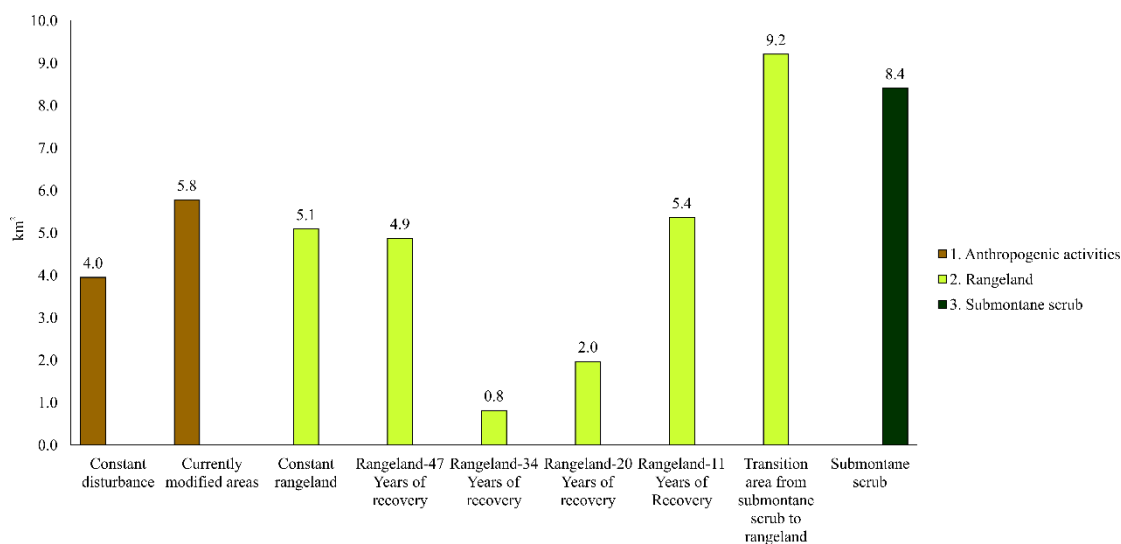


Figura 17. Área representada (km²) para cada categoría de uso de suelo durante el periodo de estudio, San Antonio, Jaumave, Tamaulipas, México.

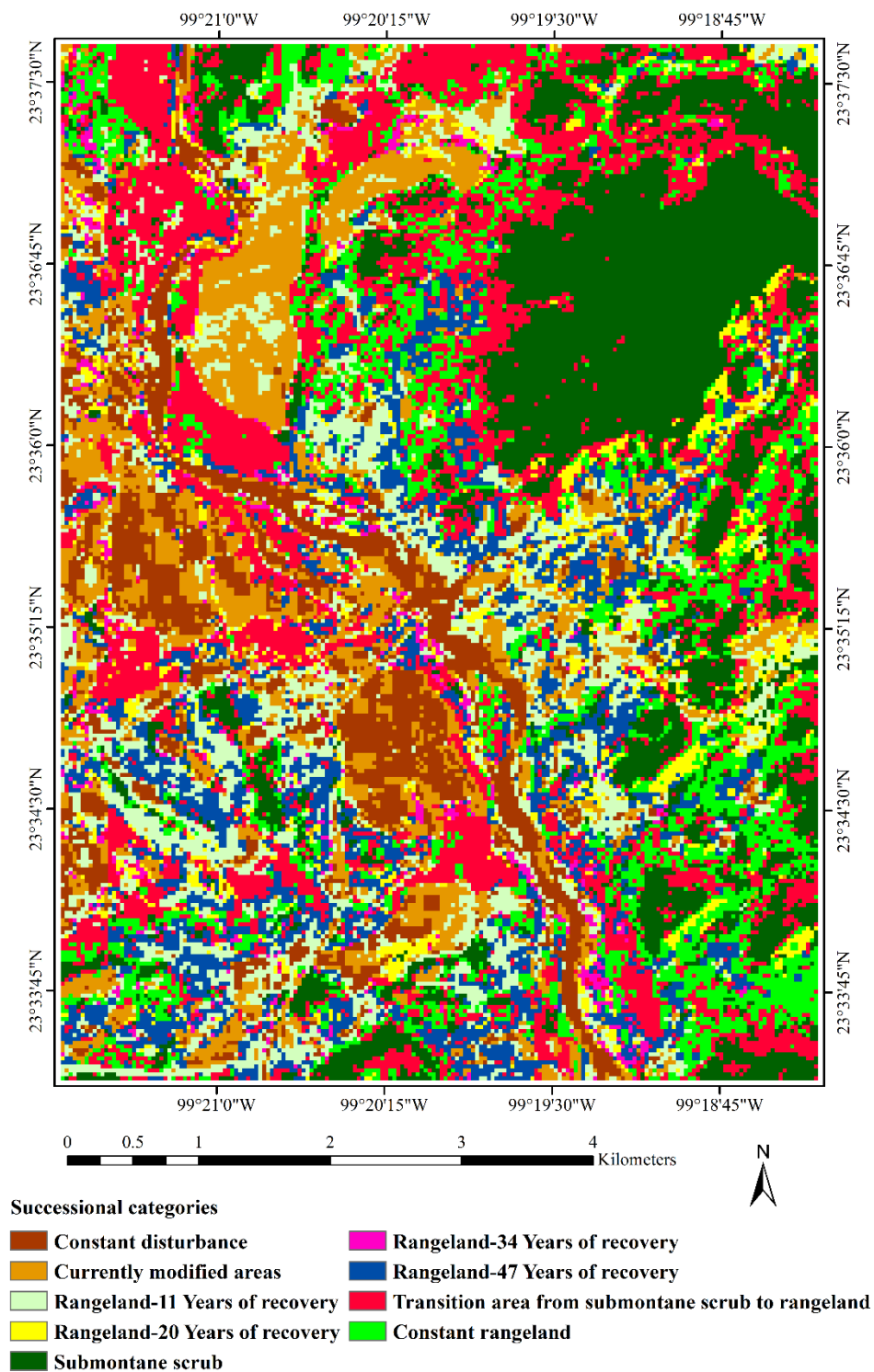


Figura 18. Categorías sucesionales de cobertura y cambios de uso de suelo, San Antonio, Jaumave, Tamaulipas, México.

6.1.3 Cambios en el uso del suelo y la cobertura vegetal en La Peña, Miquihuana, Tamaulipas.

En el periodo de 1973, las actividades antrópicas cubrieron un área total de 16 km² (41.89%) en La Peña, seguido por 12 km² (31.83%) de bosque de pino-encino, y 10 km² (26.27%) de agostadero. Los cambios para el año 2020 no fueron notables, ya que persiste una cobertura similar para la categoría de actividades antrópicas (15 km² que representan 37% del área total) y agostadero (12 km², 30.41%). Curiosamente, la cobertura de bosque de pino-encino aumentó a 32.11% (13 km²) (Figura 19 y Figura 20).

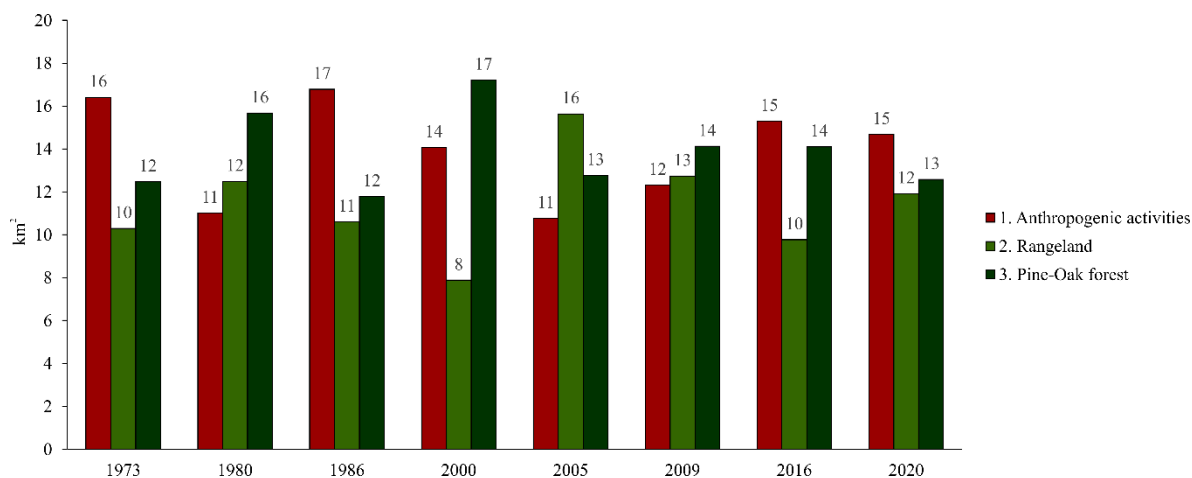


Figura 19. Cobertura y cambios de uso del suelo en el periodo de estudio, La Peña, Miquihuana, Tamaulipas, México.

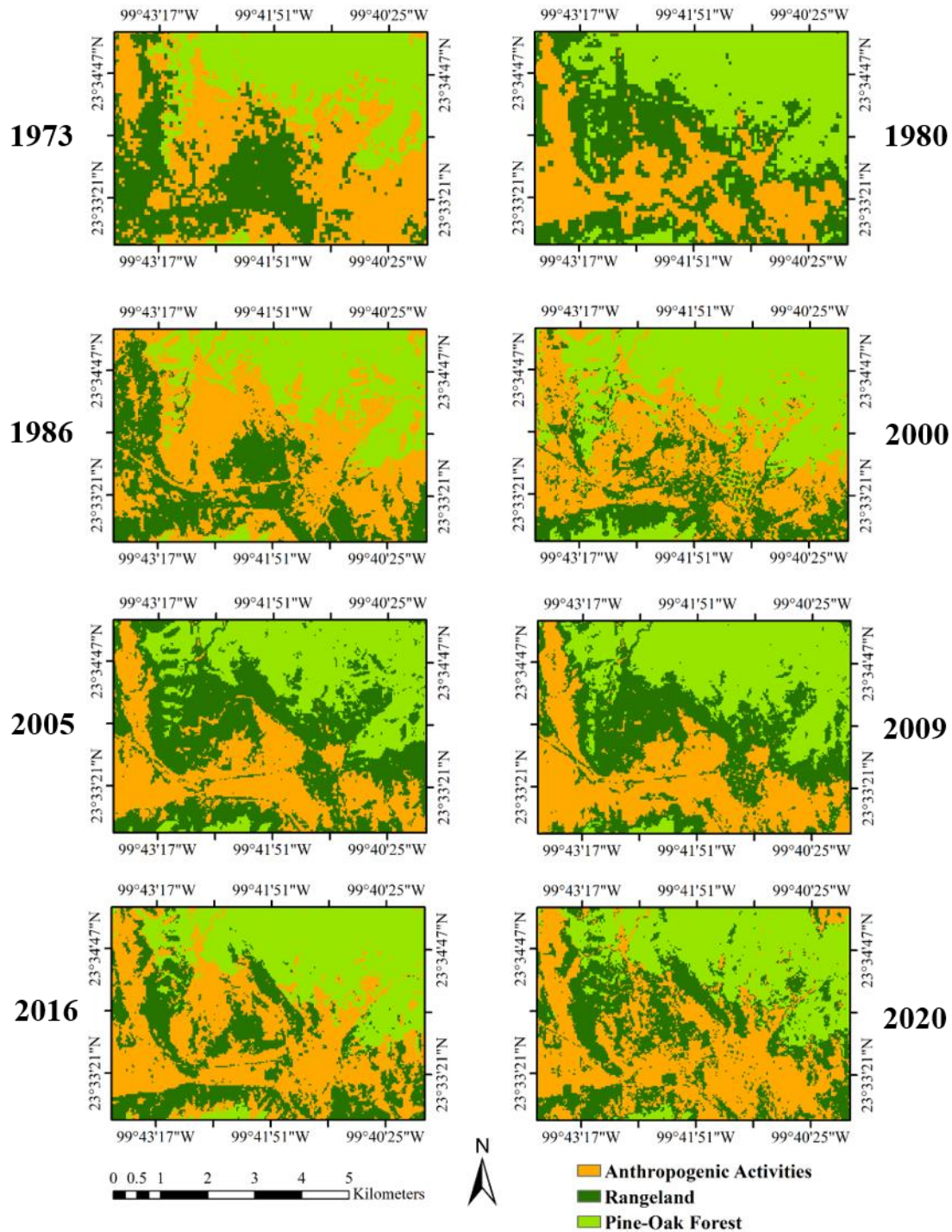


Figura 20. Cobertura de uso de suelo en 1973, 1980, 1986, 2000, 2005, 2009, 2016 y 2020, La Peña, Miquihuana, Tamaulipas, México.

La cobertura de agostadero tuvo un aumento considerable de 2000 a 2005 (Figura 21 d); 11% de esta categoría persistió entre años, mientras que 17% de las actividades antrópicas y 11% del bosque de pino-encino mostraron una transición a agostadero en 2005. En conjunto, esta

categoría representó una cobertura de 15,63 km² (39,92% del total de 39 km²) durante ese período. En comparación, se observó una disminución al 30% de la cobertura total de agostadero para 2016-2020 (Figura 21 g).

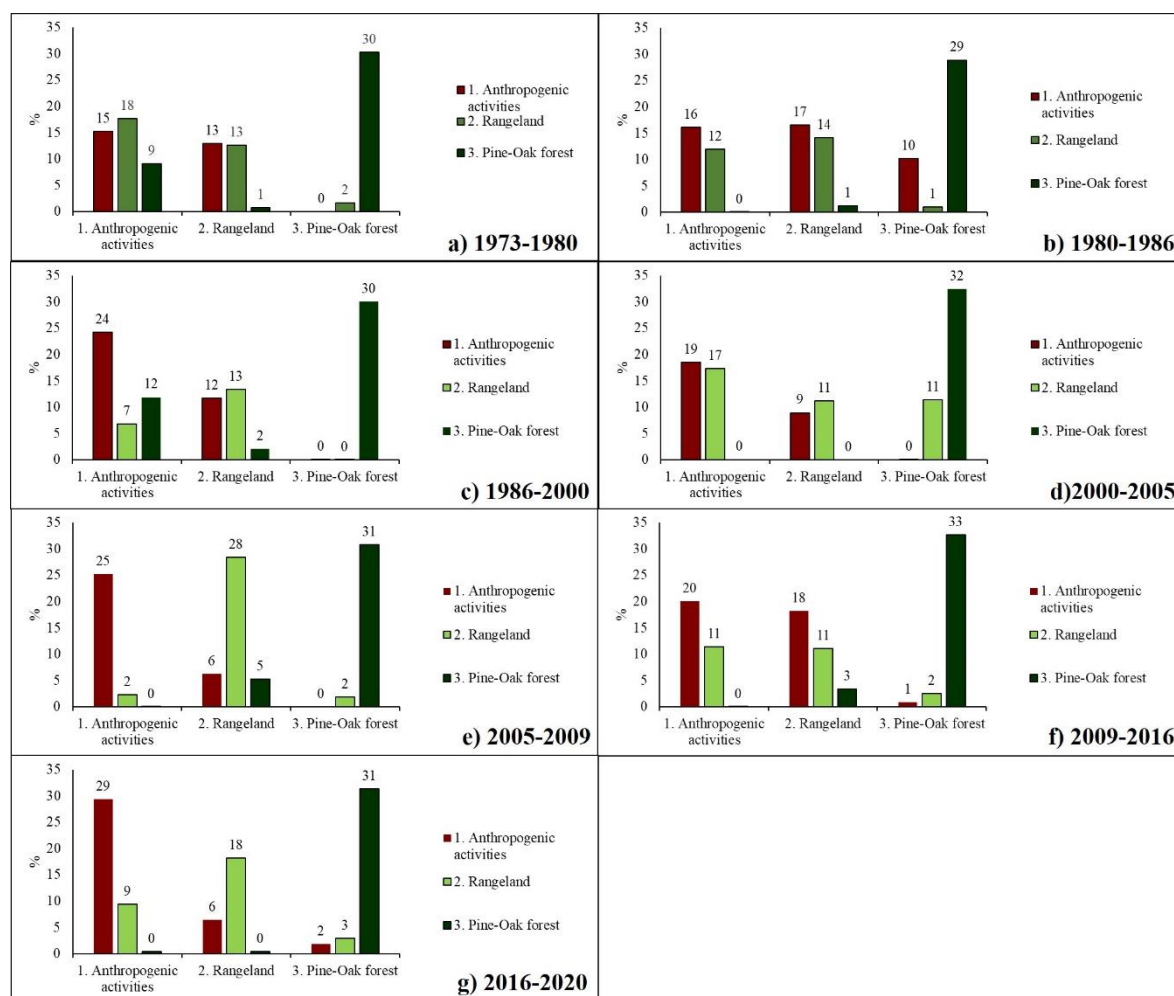


Figura 21. Porcentaje de cambios en la cobertura del suelo en los escenarios de (a) 1973-1980, (b) 1980-1986, (c) 1986-2000, (d) 2000-2005, (e) 2005-2009, (f) 2009-2016, y (g) 2016-2020, La Peña, Miquihuana, Tamaulipas, México.

De acuerdo con el análisis sucesional, 7.3 km² (18.71%) pertenecían a áreas de agostaderos en etapa de recuperación, observándose el valor más alto (3.4 km²) en la categoría de 11 años. Los valores más bajos correspondieron a agostaderos constantes, solo 0.6 km² (1.53%), y 10.25% (4.0 km²) se modificó de bosque de pino-encino a agostaderos. Para 2020, 2.1 km² (5.38%) permanecieron en estado de perturbación constante, mientras que 32.05% (12.5 km²) de la cobertura se encontraba actualmente modificada por actividades antrópicas. La

categoría de cobertura del suelo con mayor superficie fue el bosque de pino-encino con 12.6 km² (32.30%) (Figura 22), que abarcó una mayor proporción al norte y, en menor medida, al sur. Es importante señalar que las actividades antrópicas y el agostadero se ubicaron sobre la planicie de pastizales. Además, se observó que las actividades antrópicas y el agostadero desplazaban áreas de bosque de pino-encino (Figura 23 y Figura 20).

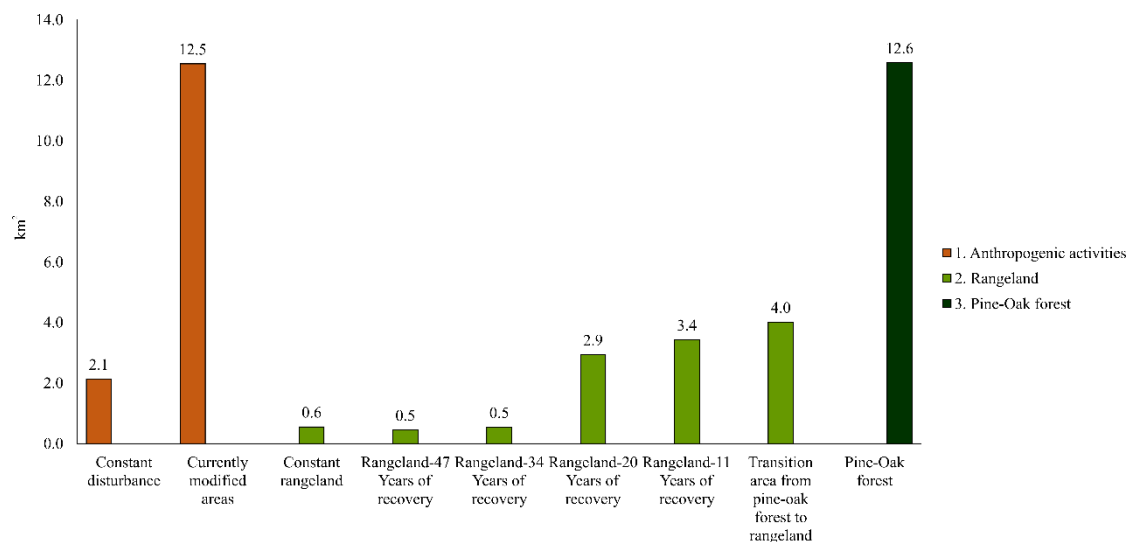


Figura 22. Área representada (km²) para cada categoría de uso de suelo durante el periodo de estudio, La Peña, Miquihuana, Tamaulipas, México.

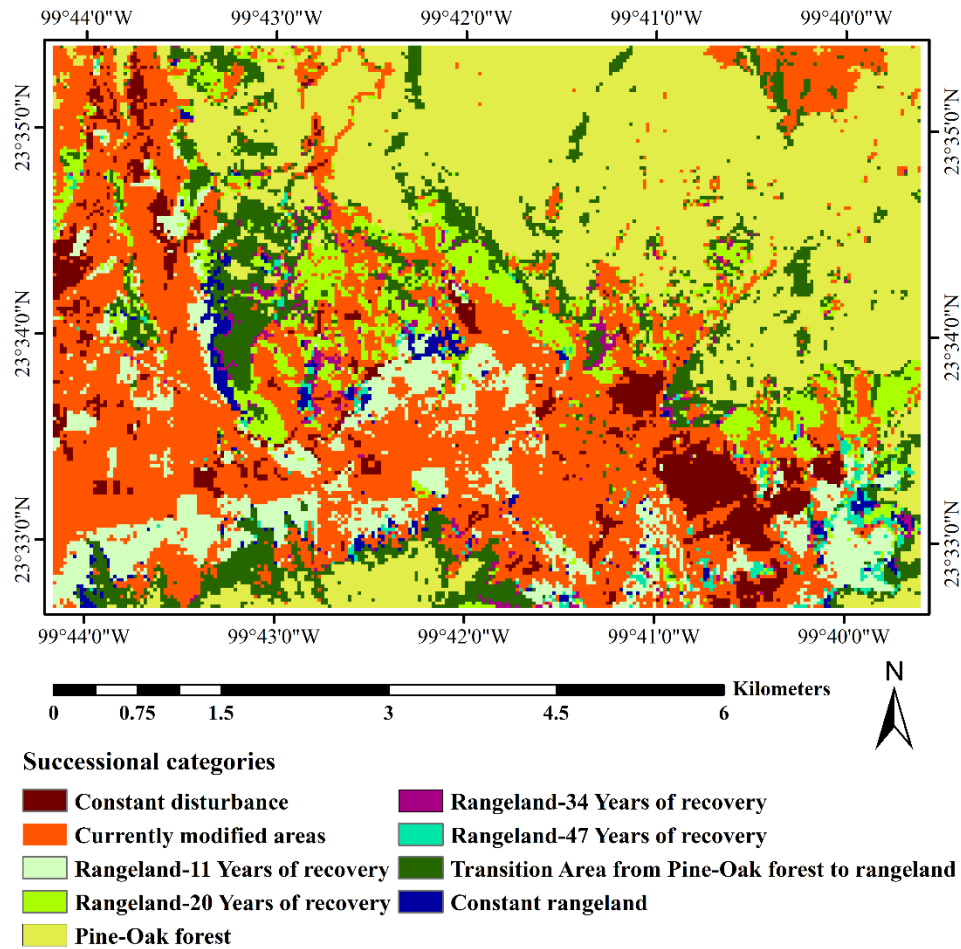


Figura 23. Categorías sucesionales de cobertura y cambios de uso del suelo, La Peña, Miquihuana, Tamaulipas, México.

6.1.4 Cambios en el uso del suelo y la cobertura vegetal en San Vicente, Palmillas, Tamaulipas

Las actividades antropogénicas en 1973 fueron la categoría LULC con mayor cobertura, ocupando 17 km² (40.20% del área total), seguida por el agostadero con 33.10% (14 km²) y los bosques de pino-encino con 26.70% (11 km²). En contraste, las actividades antropogénicas disminuyeron en cobertura para el periodo 2020, manteniéndose en 37.83% (16 km²). Asimismo, los agostaderos aumentaron considerablemente en área hasta 19 km² (44.93%); sin embargo, los bosques de pino-encino perdieron 10% de cobertura, manteniéndose con 16.55% (7 km²) (Figura 24 y Figura 25).

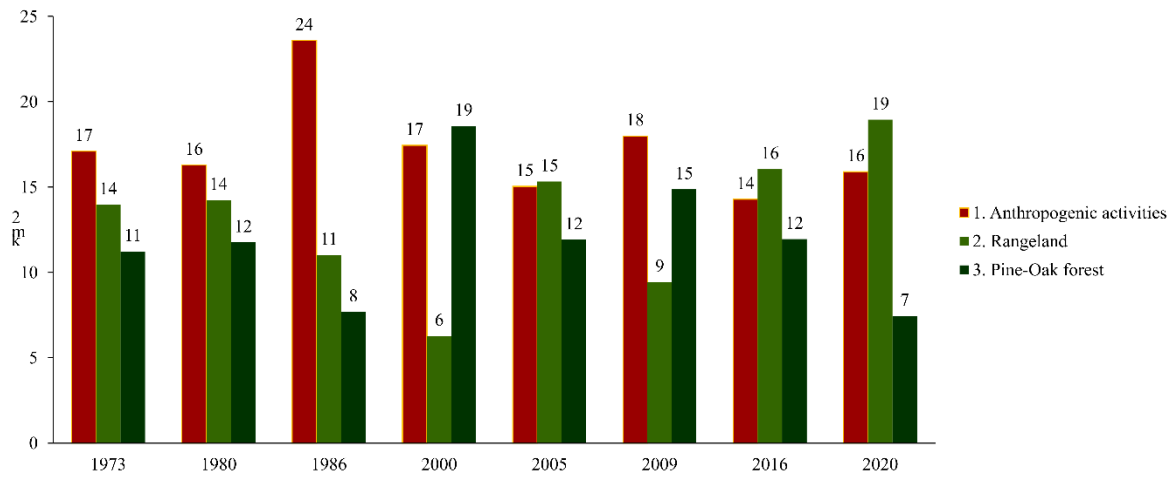


Figura 24. Cobertura y cambios de uso del suelo en el periodo de estudio, San Vicente, Palmillas, Tamaulipas, México.

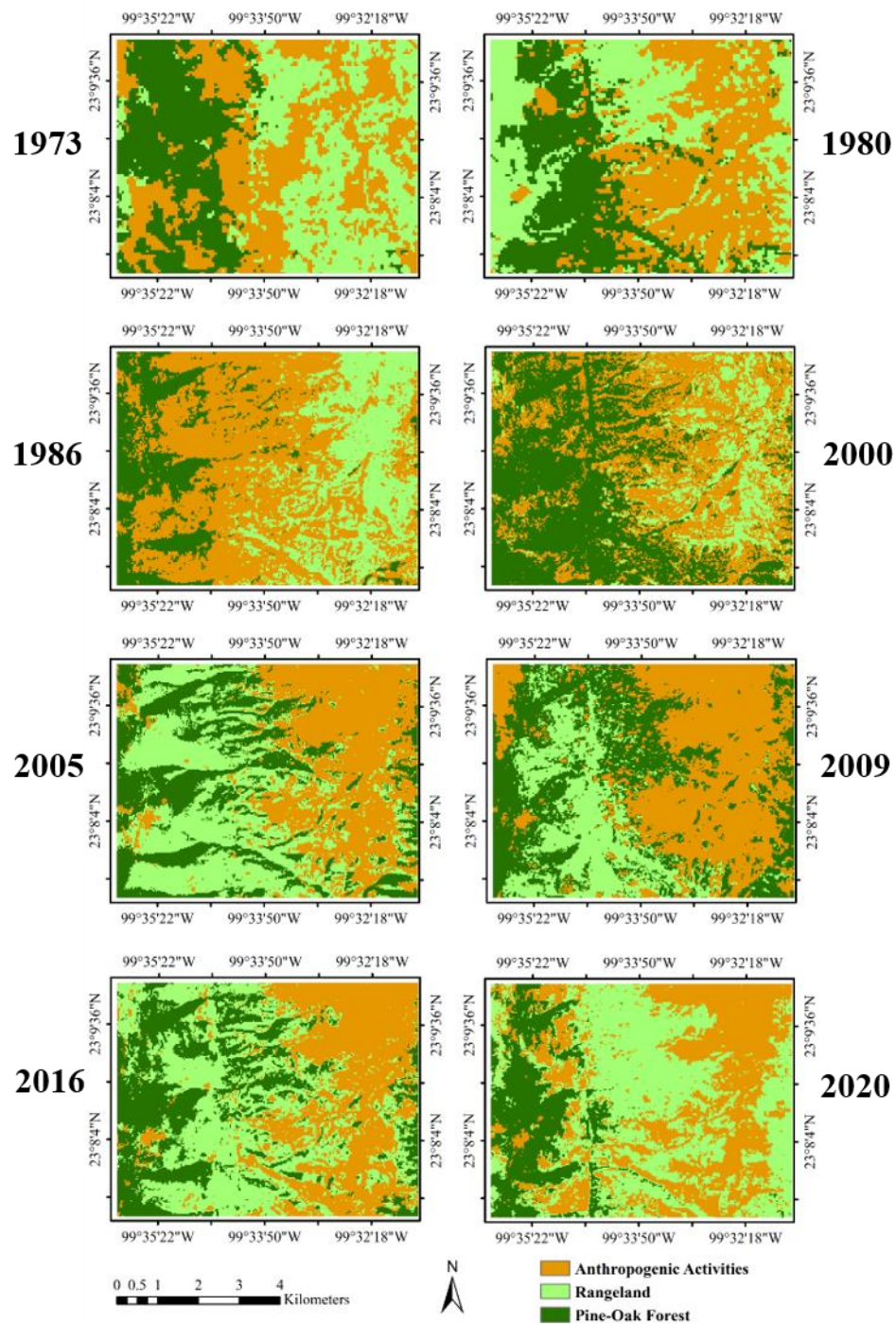


Figura 25. Cobertura de uso de suelo en 1973, 1980, 1986, 2000, 2005, 2009, 2016 y 2020, San Vicente, Palmillas, Tamaulipas, México.

La cobertura total de agostadero tuvo un incremento considerable en el periodo 2009-2016 (Figura 26), donde 13% de esta vegetación persistió entre ambos años. Además, 13% de las

áreas con actividades antrópicas y 12% con bosques de pino-encino fueron convertidas a agostadero en el mismo periodo, con una cobertura total de 16.05 km² (38.0% de un total de 42 km²) (Figura 26 g).

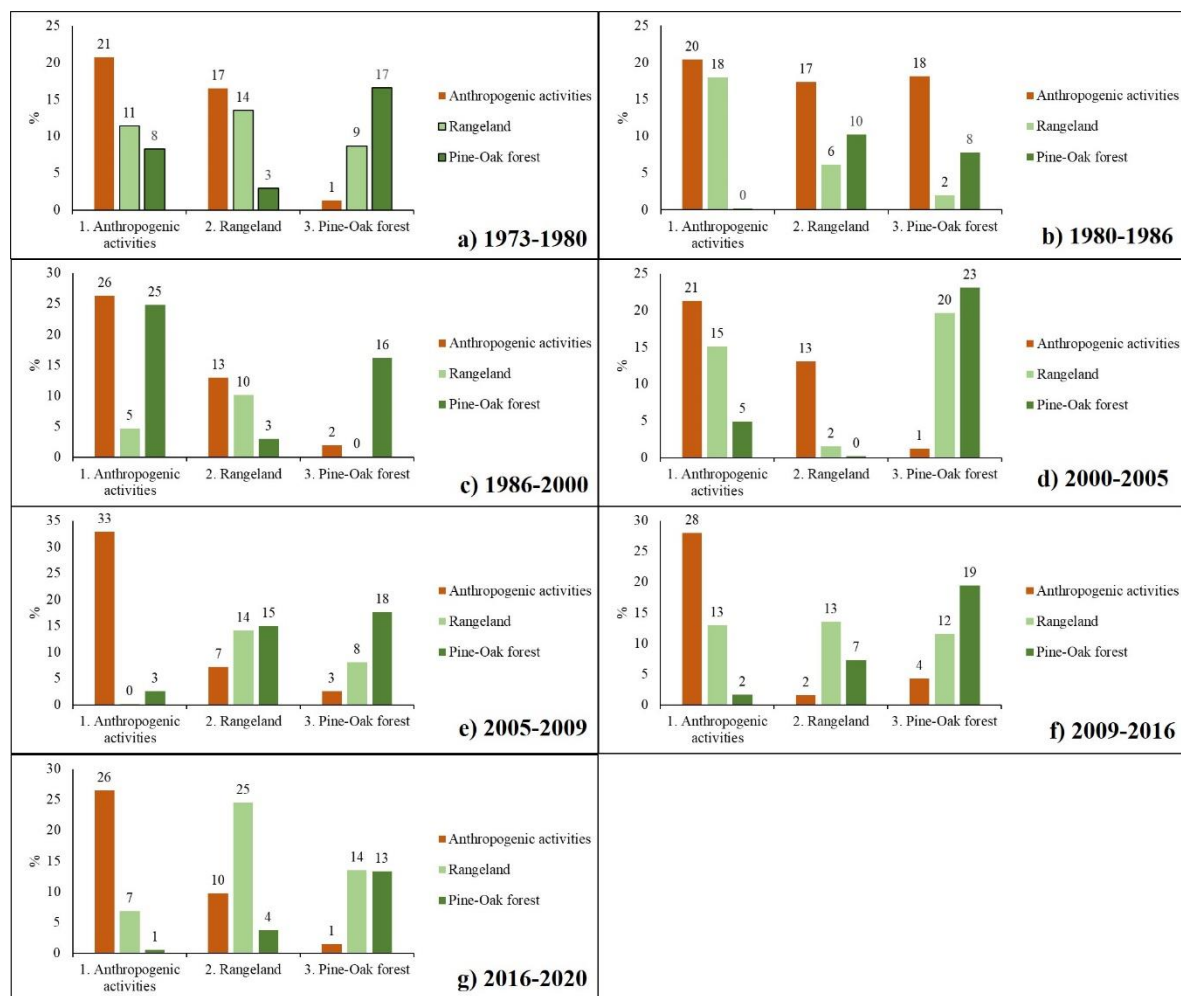


Figura 26. Porcentaje de cambios en la cobertura terrestre en escenas de (a) 1973-1980, (b) 1980-1986, (c) 1986-2000, (d) 2000-2005, (e) 2005-2009, (f) 2009-2016 y (g) 2016-2020, San Vicente, Palmillas, Tamaulipas, México.

El agostadero actual en el municipio de Palmillas estuvo integrado principalmente por áreas con menor tiempo de sucesión, siendo aquellas que no han sido perturbadas desde el año 2009 (6.78 km²), así como por una superficie considerable de 11.57 km² (27.36%) de bosque de pino-encino que pasó a formar parte del agostadero (Figura 27 y Figura 28). La proporción de áreas con diferentes tiempos de sucesión o agostadero persistente fue muy baja, menor a 1 km². En cuanto a las actividades antrópicas, 2.28 km² (5.39%) permanecen bajo

perturbación constante y 32% (13.62 km²) se encuentran actualmente modificadas (2020). La cobertura real del bosque de pino-encino fue de 7.44 km² (17.59%) (Figura 27), concentrada al oeste del polígono y rodeada de áreas de transición al agostadero (Figura 28). Además, las actividades antrópicas están ganando terreno hacia la vegetación de bosque de pino-encino (Figura 28 y Figura 25).

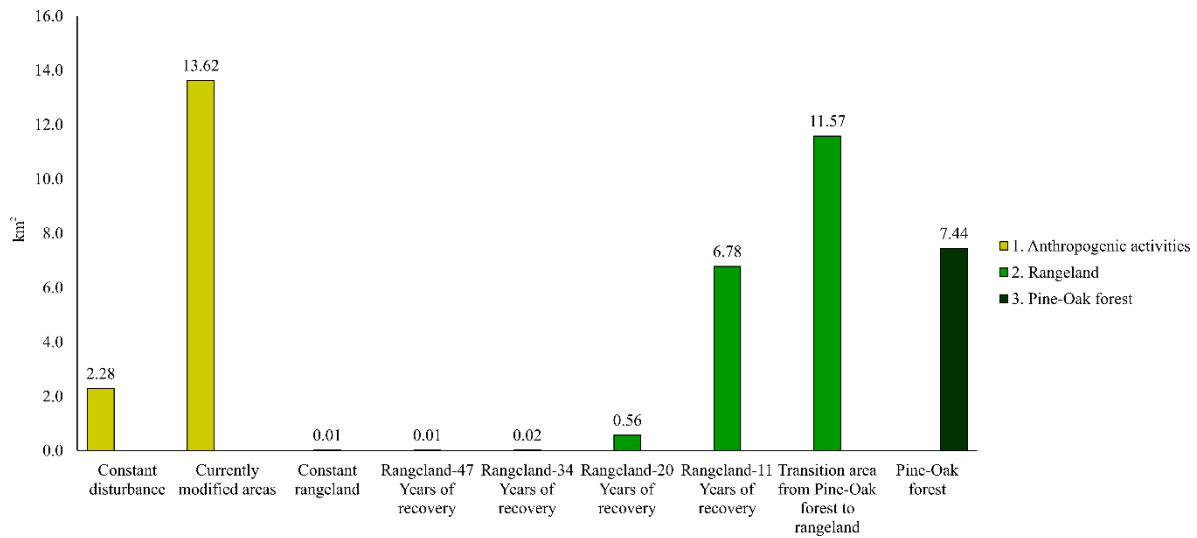


Figura 27. Área representada (km²) para cada categoría de uso de suelo durante el periodo de estudio, San Vicente, Palmillas, Tamaulipas, México.

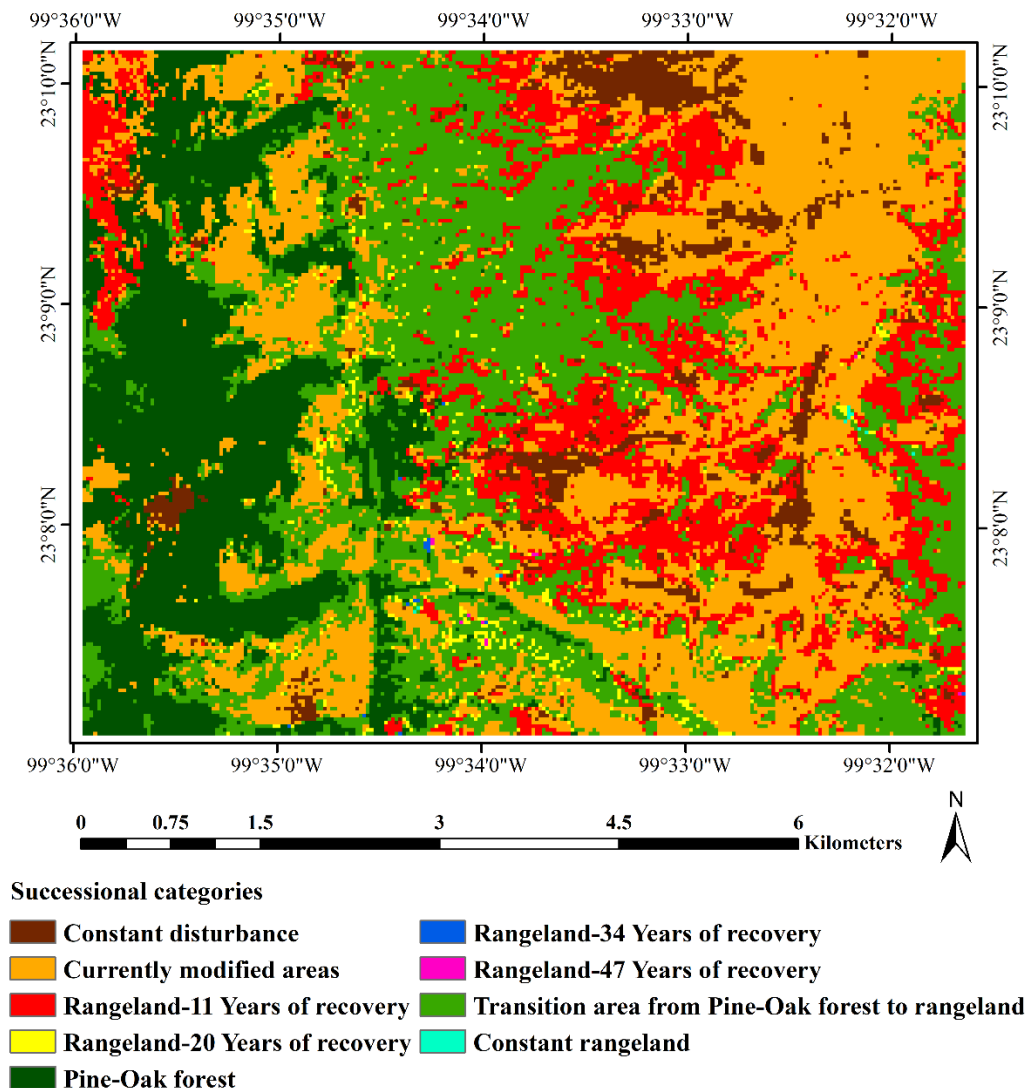


Figura 28. Categorías de cobertura sucesional y cambios en el uso del suelo, San Vicente, Palmillas, Tamaulipas, México.

6.1.5 Cambios de uso de suelo y cobertura vegetal en El Llano y Anexas, Bustamante, Tamaulipas

En 1973, la categoría de actividades antrópicas comprendía 64 km², representando más del 50% (54%) del área del polígono; los agostaderos cubrían 28 km² (23.62%) y la cobertura del bosque de táscate era de 21.94% (26 km²). Después de 47 años (2020), las actividades antrópicas mantuvieron su cobertura en 63 km² (53.16%); sin embargo, los agostaderos incrementaron su área a 38.81% (46 km²), mientras que el bosque de táscate perdió 65% de su cobertura, quedando solo 9 km² (Figura 29 y Figura 30).

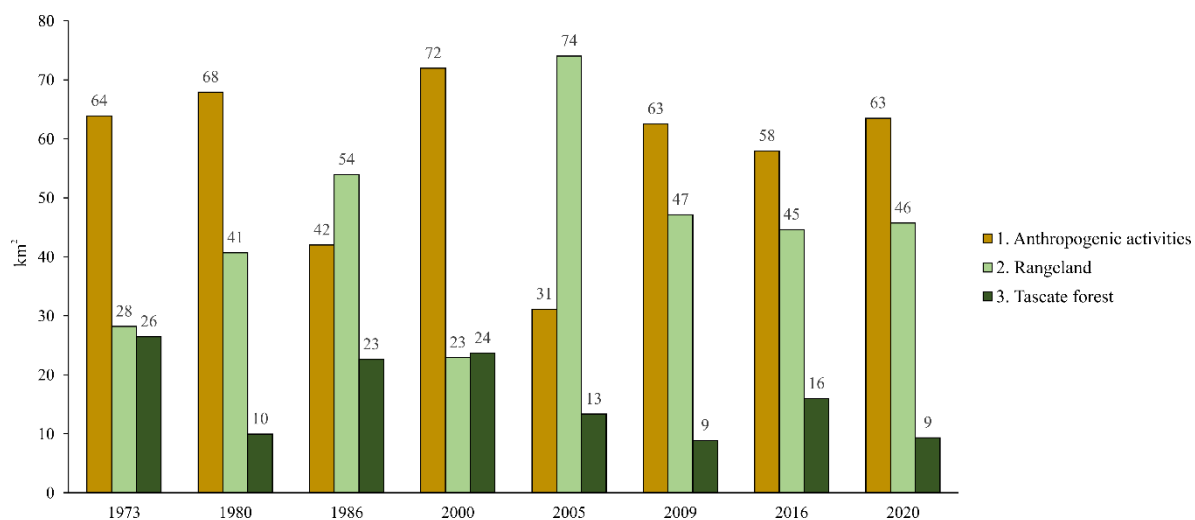


Figura 29. Cobertura y cambios de uso del suelo en el período de estudio, El Llano y Anexas, Bustamante, Tamaulipas, México.

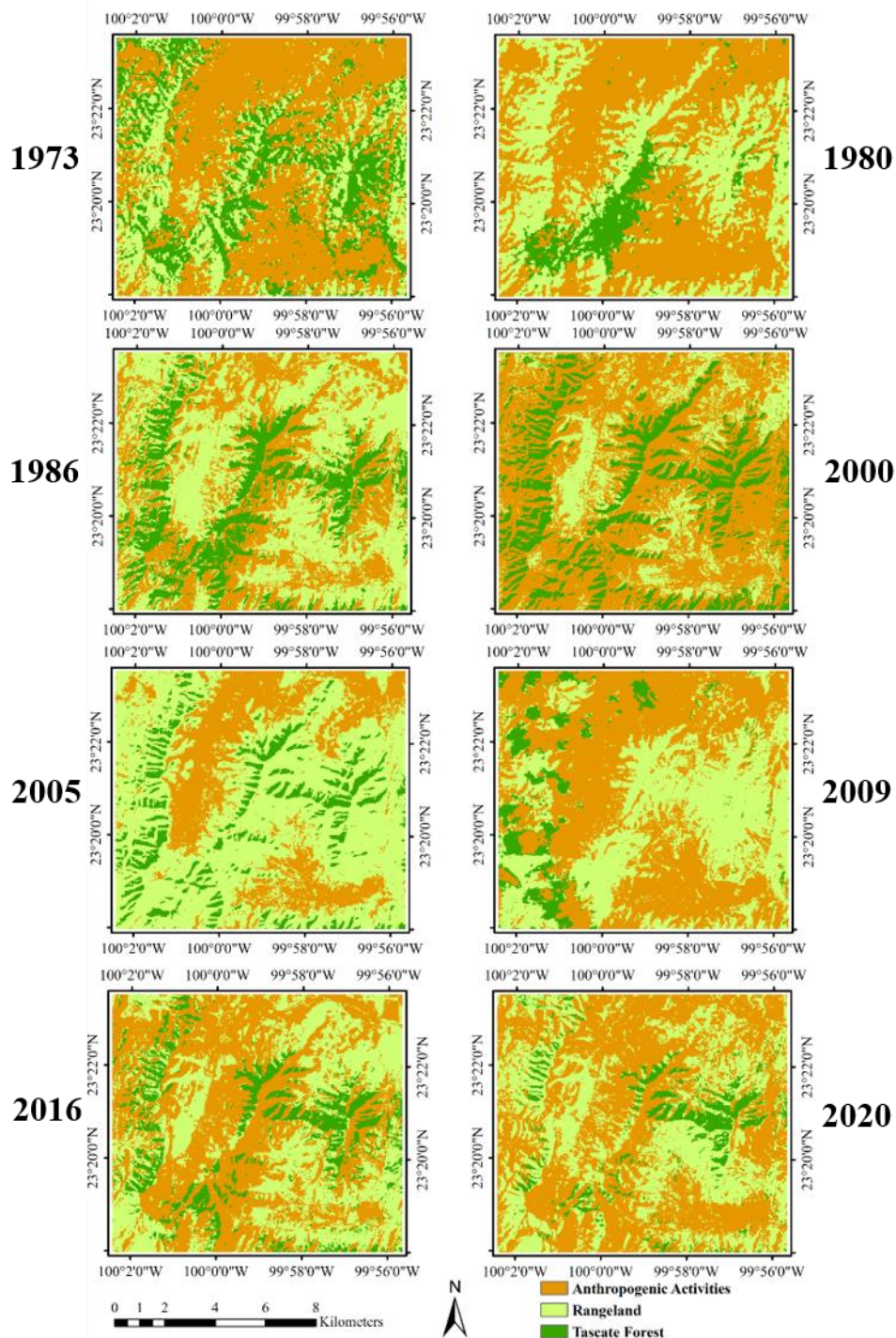


Figura 30. Cobertura de uso de suelo en 1973, 1980, 1986, 2000, 2005, 2009, 2016 y 2020, El Llano y anexas, Bustamante, Tamaulipas, México.

El principal incremento en la cobertura del agostadero ocurrió entre 2000 y 2005 (Figura 31 d), ya que el 44% de las áreas fueron cubiertas por actividades antrópicas, y el 9% del bosque de táscate cambió a agostadero; sólo el 9% de las áreas originales persistieron entre años.

Así, para este período, el agostadero tenía el 62% de la cobertura total del suelo (74 km² de 119 km²) de esta localidad.

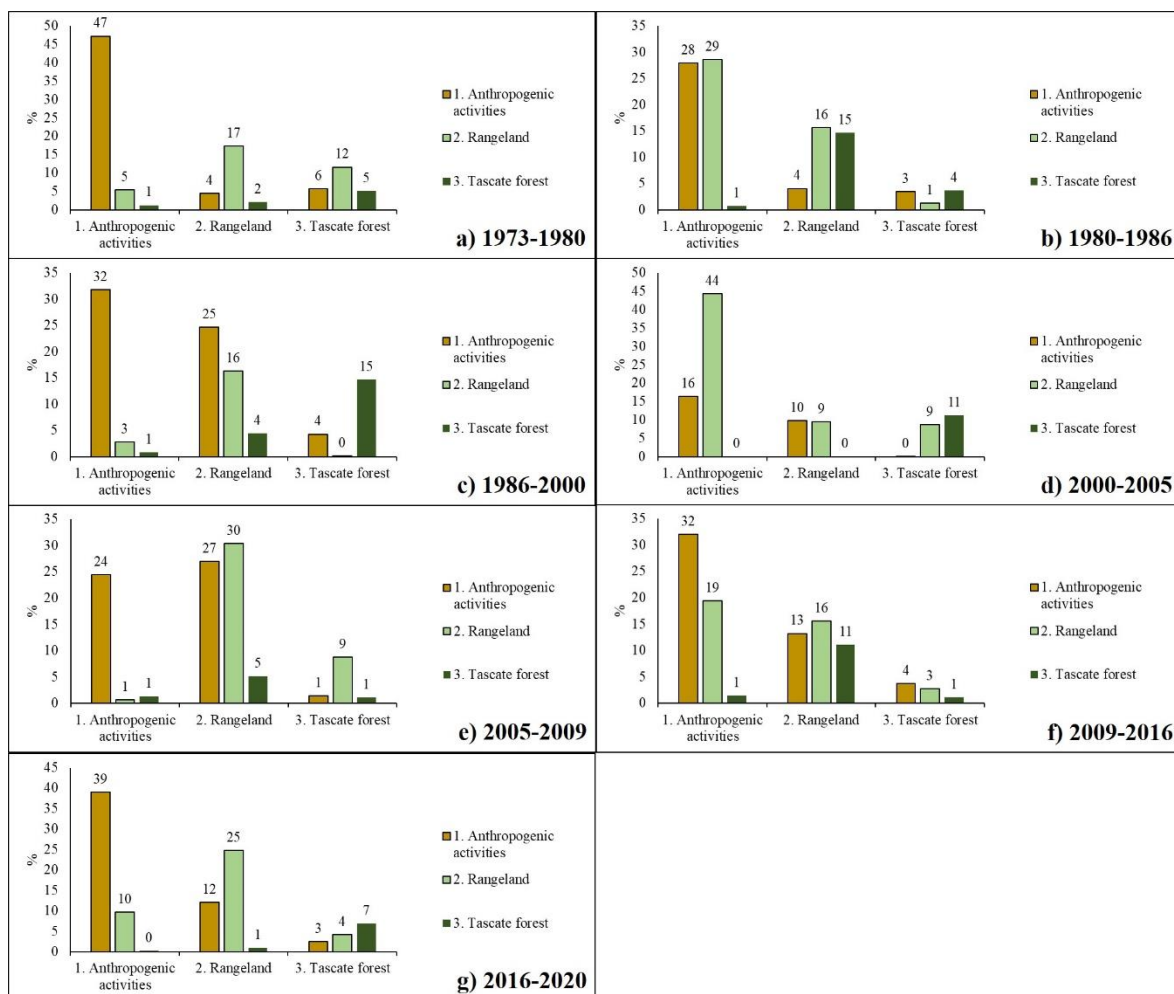


Figura 31. Porcentaje de cambios en la cobertura de suelo en escenas de (a) 1973-1980, (b) 1980-1986, (c) 1986-2000, (d) 2000-2005, (e) 2005-2009, (f) 2009-2016 y (g) 2016-2020, El Llano y Anexas, Bustamante, Tamaulipas, México.

De acuerdo con el análisis sucesional, 33.4 km² (28.18%) del área de la localidad estuvo representada por una categoría de recuperación de agostadero, siendo las áreas con 11 años de mayor cobertura (20.8 km²). Solo 0.9 km² (0.75%) se conservó como agostadero constante y 9.62% (11.4 km²) cambió de bosque de táscate a dicha categoría. Las actividades antrópicas, 17.3 km² (14.59%) persistieron como perturbación constante y 38.90% (46.1 km²) se encontraban actualmente (2020) modificados. El bosque de táscate se mantuvo con 7.84% (9.3 km²) de cobertura total (Figura 32) y su distribución aparece fragmentada debido

a la sucesión a agostadero. Las áreas antropogénicas y los agostaderos se encontraron en todo el polígono, aunque no siguiendo un patrón geográfico claro (Figura 33 y Figura 30).

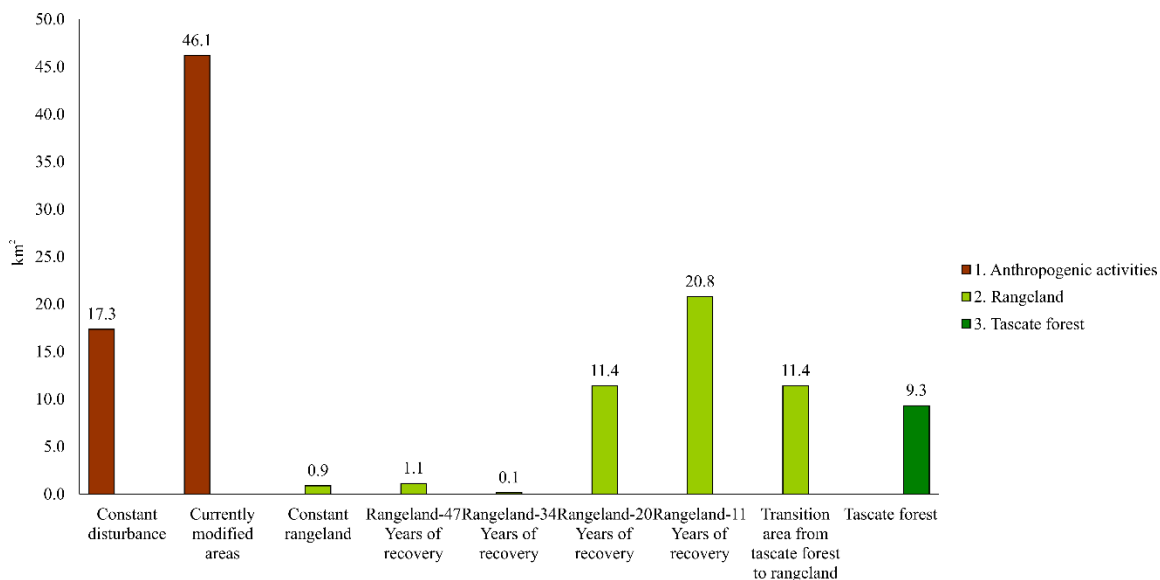


Figura 32. Área representada (km²) para cada categoría de uso de suelo durante el periodo de estudio, El Llano y Anexas, Bustamante, Tamaulipas, México.

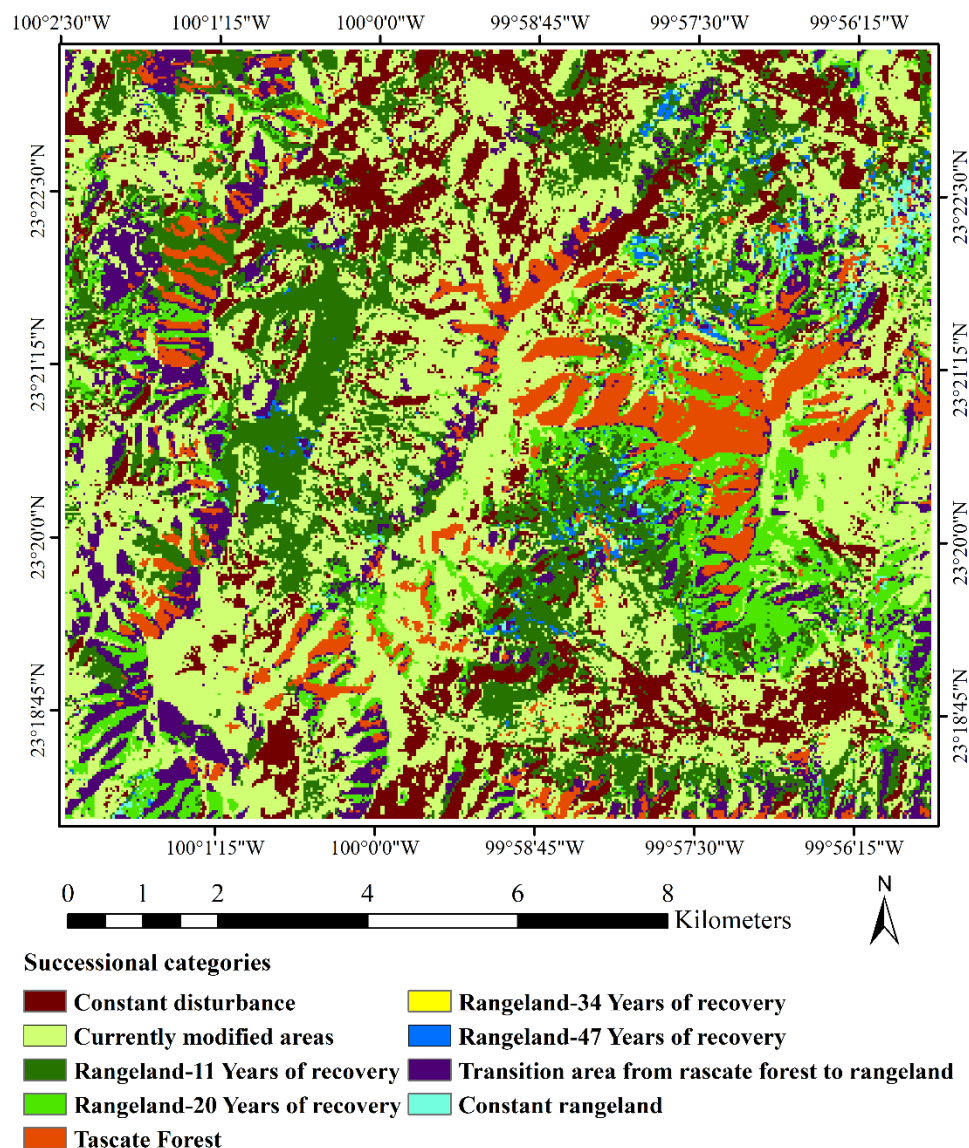


Figura 33. Categorías sucesionales de cobertura y cambios de uso de suelo, El Llano y Anexas, Bustamante, Tamaulipas, México.

6.2 Producción de Biomasa

6.2.1 Productividad en el forraje de *Opuntia ficus-indica* Mill. (L.)

Los parámetros de materia fresca (mf) y materia seca (ms) indican que la variedad Villanueva con el tratamiento 6 (densidad de 8 plantas por m² y 35 kg de fertilizante orgánico) y la variedad Copena V1 con el tratamiento 3 (12 plantas por m² y 35 kg de fertilizante) son las que mayor producción de biomasa (seca y verde) alcanzaron durante el periodo de evaluación en donde se lograron 4 cortes a lo largo de las cuatro estaciones del año (Figura 34 y Tabla

6). De igual forma la mayor producción de cladodios por planta se presentó en el tratamiento 6. Sin embargo, la mayor producción de cladodios por metro cuadrado (m^2) se presentó en el tratamiento 3 con la variedad Copena V1 (12 plantas por m^2 y 35 kg de fertilizante orgánico). Otros parámetros productivos importantes fueron el largo y ancho del cladodio, cuyos valores más altos se presentaron en el tratamiento 6 y 5 (Tabla 6).

Tabla 6. Parámetros productivos obtenidos en los tratamientos analizados durante el periodo evaluado.

Tratamientos	No. de cladodios por planta	Cladodios por m^2	Largo (cm)	Ancho (cm)	Espesor (cm)	Área Foliar (Área en cm^2)	Peso Fresco (g)	Peso seco (g)	mf por m^2 (kg)	ms por m^2 (kg)
1.- C1200	4	44	14	9	1	97	105	12	5	0.52
2.- C1220	5	61	24	15	2	286	467	52	28	3.18
3.- C1235	6	72	24	15	1	276	516	56	37	4.05
4.-V0800	2	20	17	11	1	150	129	15	3	0.29
5.-V0820	6	44	28	18	1	391	700	77	31	3.40
6.-V0835	7	52	30	19	2	441	788	80	41	4.16

C1200= Copena V1, 12 plantas/ m^2 , 00 sin fertilizante; **C1220**= Copena 12 plantas/ m^2 , 20 kg de fertilizante; **C1235**= Copena V1, 12 plantas/ m^2 , 35 kg de fertilizante; **V0800**= Villanueva, 08 plantas/ m^2 , 00 sin fertilizante; **V0820**= Villanueva, 08 plantas/ m^2 , 20 kg de fertilizante; **V0835**= Villanueva, 08 plantas/ m^2 , 35 kg de fertilizante.

Al aumentar la dosis de fertilizante orgánico por m^2 aumenta considerablemente la producción de biomasa seca en las dos variedades (Figura 29). Sin embargo, se identificó una ventaja para la variedad Copena V-1 (tratamiento C1220 vs C1235) sobre la variedad Villanueva (tratamiento V0820 vs V0835).

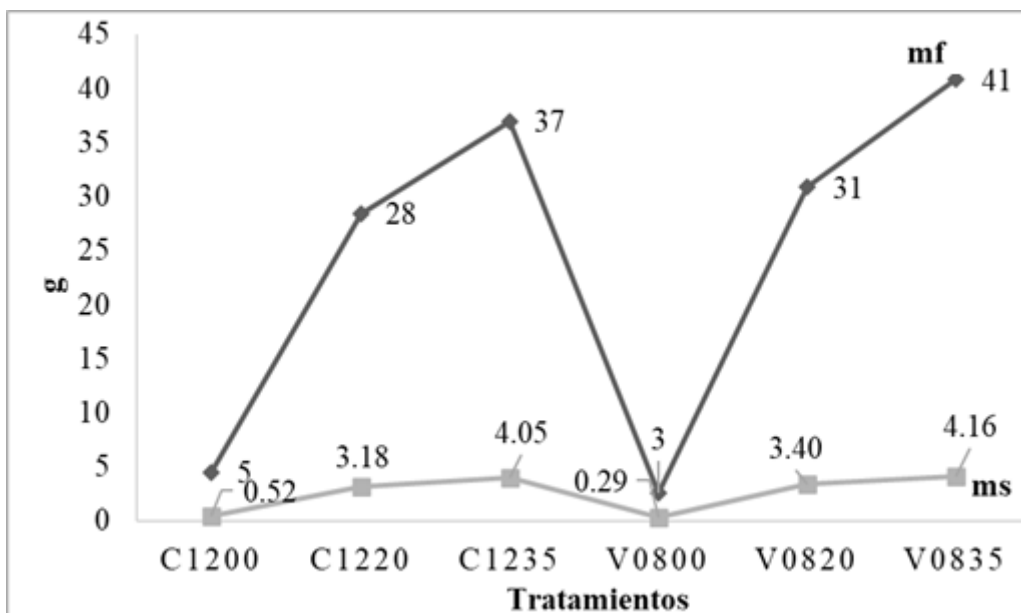


Figura 34. Producción de materia fresca y materia seca, en los tratamientos evaluados, durante un año

Los parámetros relacionados con la producción se registraron en cada estación del año (el primer corte fue en invierno, segundo en la primavera, tercero en verano y cuarto en otoño). La estación del año en la que se produjo mayor cantidad de materia seca fue en otoño en el tratamiento V0820 y V0835 y en tercer lugar fue en verano con el tratamiento 6. La menor producción que se presentó fue en otoño en el tratamiento C1200 y V0800 (variedad Copena V1; 12 plantas por m² y 0 aplicación de fertilizante-variedad Villanueva; ocho plantas por m² y 0 aplicación de fertilizante, Figura 35).

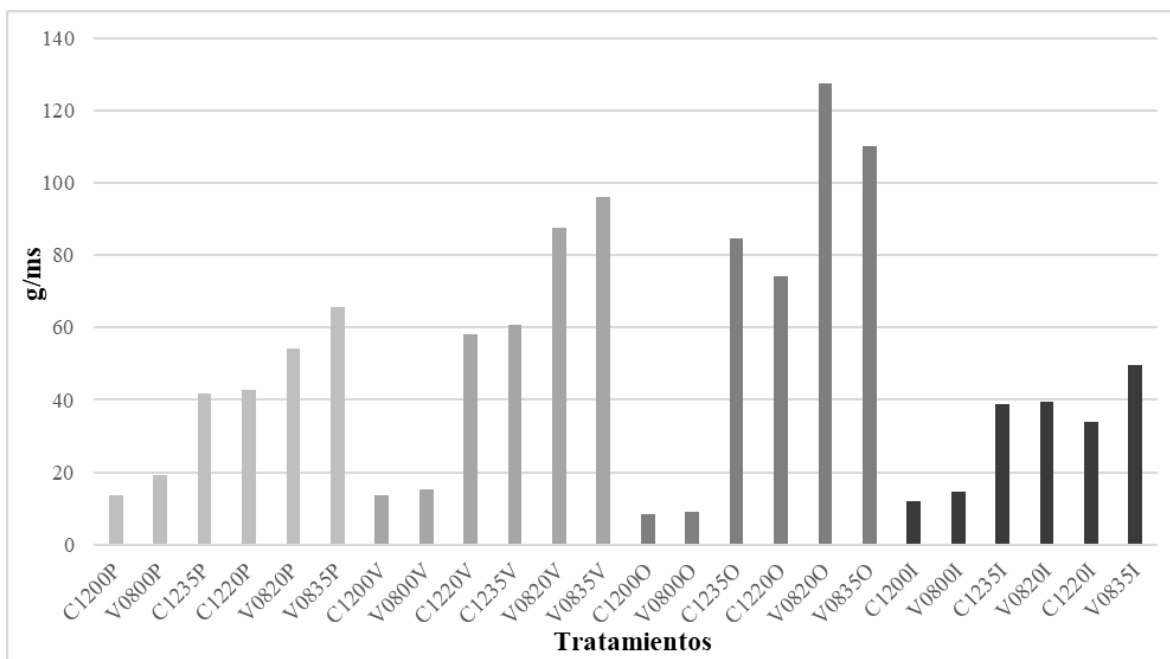


Figura 35. Producción de materia seca en las cuatro estaciones del año

El parámetro Cladodios por m² fueron mayores en los tratamientos C1235 y C1220 y se presentaron en las estaciones de verano y primavera. El largo, ancho y el área foliar fue mayor en los tratamientos V0820 y V0835 en el otoño (Tabla 7).

Tabla 7. Parámetros morfológicos en las cuatro estaciones del año

Categorías	No. de cladodios por planta	Cladodios por m ²	Largo (cm)	Ancho (cm)	Espesor (cm)	Área Foliar (Área cm ²)	Peso Fresco (g)	Peso seco (g)
C1200P	2	44	14	8	1	88	124	14
C1220P	3	76	23	14	2	237	401	43
C1235P	3	80	23	13	2	237	403	42
V0800P	1	18	17	11	1	144	176	19
V0820P	3	52	25	16	1	304	532	54
V0835P	4	58	27	17	2	340	637	66
C1200V	2	41	15	10	1	115	113	13
C1220V	2	59	26	16	1	324	484	58
C1235V	4	90	27	16	1	338	517	61
V0800V	2	25	15	11	1	122	128	15
V0820V	3	48	31	19	1	445	732	87
V0835V	4	61	33	20	2	481	794	96

C1200O	2	47	15	9	1	103	75	9
C1220O	2	41	26	17	2	342	662	74
C1235O	3	66	25	16	2	319	790	84
V0800O	1	19	18	12	1	164	83	9
V0820O	3	45	34	22	2	573	1157	128
V0835O	3	49	36	23	2	631	1241	110
C1200I	2	42	13	8	1	81	106	12
C1220I	3	68	23	14	1	239	322	34
C1235I	2	50	22	13	1	210	355	39
V0800I	1	18	19	12	1	171	129	15
V0820I	2	32	22	14	1	241	379	39
V0835I	3	40	25	16	1	313	482	50

6.2.2 Análisis estadístico

El análisis de funciones discriminantes mostro diferencias significativas entre los seis tratamientos evaluados ($F = 82.88769$; $p < 0.0000$). El valor discriminante del modelo indica una alta eficiencia de las raíces para diferenciar los elementos entre grupos (Wilks' Lambda=0.0148579). Ante esto, es poco probable que los tratamientos analizados sean similares entre sí. La primera raíz explicó el 74 % de la variación entre los tratamientos y la raíz 2 el 23%. De acuerdo en las comparaciones por pares, todos los tratamientos tuvieron diferencias significativas (Tabla 8).

Tabla 8. Comparación por pares en los tratamientos evaluados. Grados de libertad = 7,108.

		Valores de p					
Tratamientos		C1220	C1235	C1200	V0820	V0835	V0800
Valores de F	C1220		0.046690	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
	C1235	2.1267		0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
	C1200	55.7400	48.1633		0.000000	0.000000	0.000000
	V0820	137.7615	146.6677	130.5247		0.031195	0.000000
	V0835	146.4736	156.3905	140.1319	2.3084		0.000000
	V0800	95.3797	97.1740	37.2531	47.9399	55.5973	

En este periodo de evaluación, en la raíz 1, la variable con mayor valor de correlación fue el número de cladodios por m² (-0.17); sin embargo, para la raíz 2, es el Espesor (0.57) (Tabla 9).

Tabla 9. Valores de correlación entre las variables morfológicas y las dos primeras raíces del análisis de funciones discriminantes.

Variables morfológicas	Raíz 1	Raíz 2
Cladodios por m²	-5.18539	0.50007
Número de cladodios	5.10043	0.08680
Largo	0.16506	1.97821
Espesor	0.13108	0.52029
Peso Fresco	-0.03613	-0.16154
Área Foliar (Área en cm²)	-0.10998	-3.27400
Ancho	-0.06097	1.95436

Los centroides permitieron ubicar la distancia que tienen los tratamientos y cuales están más cercanos a otros. Se puede observar que el tratamiento 5 (V0820) y 6 (V0835) comparten características similares y en el caso del tratamiento 2 (C1220) y 3 (C1235) muestran un comportamiento similar. Sin embargo, el tratamiento 1 (C1200) y 4 (V0800) no comparten características con ninguno de los otros tratamientos y se observa claramente la separación del resto de los tratamientos (Figura 36). En el primer eje discriminante el tratamiento 6 (V0835), es el que se encuentra más alejado de la media, es el tratamiento que mayor producción de biomasa (número de cladodios) arrojó, seguido del tratamiento 5 (V0820). Para el eje dos es el tratamiento 1 (C1200) y 4 (V0800) los que más se alejan de la media y son los tratamientos con menor producción de biomasa. Esta función separa de manera clara a estos tratamientos con “0” aplicación de fertilizante del resto de los tratamientos evaluados. Con ello se observa que es el tratamiento 4-Variedad Villanueva con 8 plantas por m² y 0 aplicación de fertilizante, el que menor producción de biomasa arrojó.

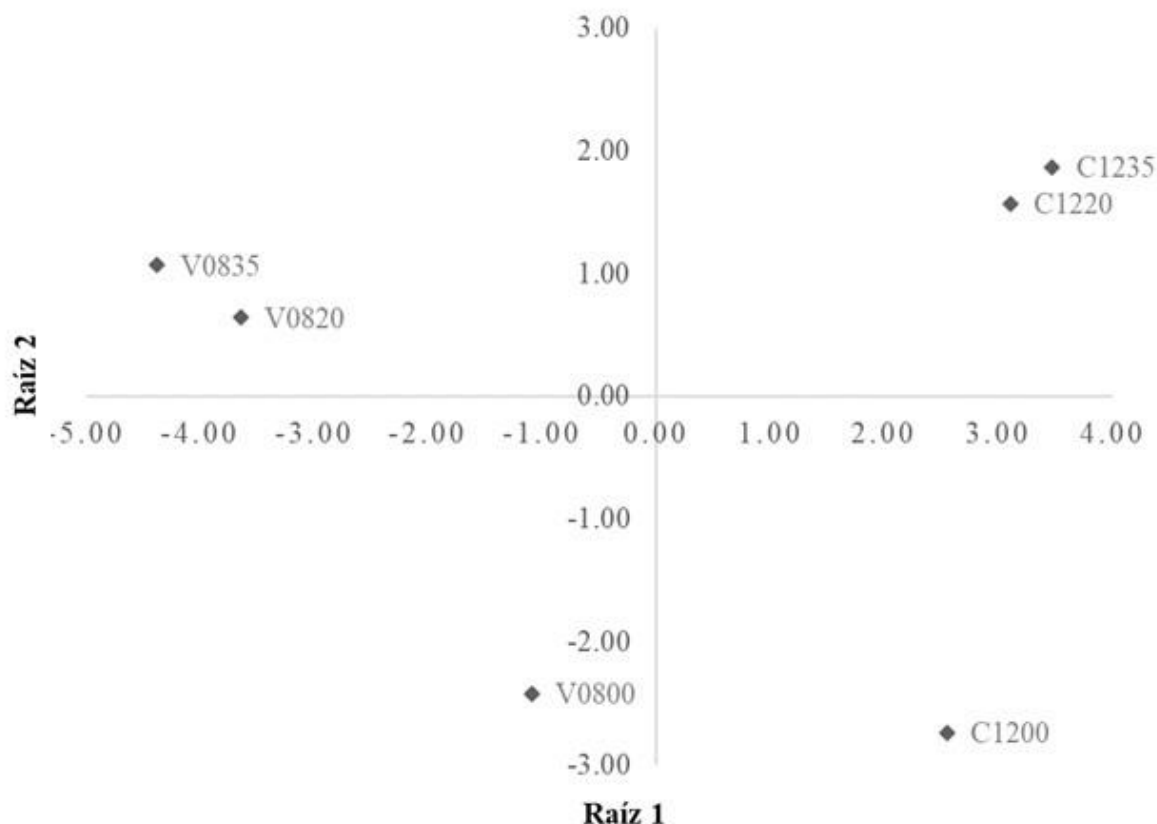


Figura 36. Centroides en los dos ejes discriminantes de los tratamientos evaluados, definidos por los componentes canónicos de la raíz 1 y 2.

7. Discusión

7.1 Evaluación del agostadero

7.1.1 Permanencia, sucesión o recuperación de las zonas de agostadero

En este estudio se consideró como agostadero, a todas las áreas con vegetación de matorral xerófilo y vegetación secundaria de bosque de pino-encino, ya que para zonas áridas, estos son los tipos de vegetación que más constituyen áreas de pastoreo (Hernández *et al.*, 2008). Las áreas cultivadas, las áreas urbanas y las áreas sin vegetación se consideraron áreas antropogénicas. De igual forma, el bosque de pino-encino, el bosque táscate y el matorral submontano se identificaron como una categoría de bosque o vegetación con un dosel superior al matorral xerófilo o vegetación secundaria de bosque de pino-encino (Granados-Sánchez *et al.*, 2007). De esta manera, la presencia de un área perturbada en una imagen satelital y su transición a una categoría de agostadero en la siguiente etapa temporal sugiere

un proceso de recuperación o sucesión, lo cual es útil para reconstruir la historia de cambios en las localidades de estudio (Allred *et al.*, 2022).

Actualmente, los estudios indican que los agostaderos atraviesan un proceso de desertificación que en algunas zonas varía de alto a muy alto; sin embargo, también es posible identificar niveles de susceptibilidad moderada-baja y zonas seguras (Djeddaoui *et al.*, 2017). En este sentido, el presente estudio muestra que las áreas de agostaderos aumentaron en cobertura general a lo largo de los años y que las áreas antropogénicas disminuyeron en las cinco localidades, mientras que el área de cobertura para el bosque táscate, el matorral submontano y el bosque de pino-encino disminuyó en tres localidades, debido principalmente a una transición a agostaderos. Tales tendencias son contrarias a la hipótesis planteada; las razones de nuestros de dichos hallazgos pueden ser que el abandono de cultivos y otras áreas está relacionado con la recuperación de la vegetación (Zermeño-Hernández *et al.*, 2015) y da paso al desarrollo de vegetación espinosa (Burgos y Maass 2004), que en este estudio se consideró como agostaderos. Asimismo, los bosques de pino-encino en México son fuente de bienes y servicios para los propietarios de tierras, pero se ven afectados por el sobrepastoreo, las plagas, el mal manejo de agostaderos, la extracción de madera, los desmontes con fines agrícolas y ganaderos y los incendios. Se presume que los incendios son provocados intencionalmente en la época seca del año para estimular el brote de plantas forrajeras para alimentar al ganado que pastorea dentro de los bosques (Rzedowski 2006). Con esta evidencia, se asume que el matorral submontano y el bosque de táscate, en las localidades de estudio, fueron afectados principalmente por el sobrepastoreo, la tala y los desmontes con fines ganaderos y agrícolas, lo que explica el incremento de agostaderos entre años. Por otro lado, se identificó que el bosque de pino-encino incrementó su cobertura en un sitio, lo que pudo tener su origen en la implementación de programas de reforestación con especies de *Pinus* en la localidad, ya que algunas variables estructurales como la altura de los árboles y la biomasa aérea han permitido identificar la recuperación de un área reforestada después de 14 años (Ventura-Ríos *et al.*, 2017). Además, el desarrollo del ecoturismo en este sitio permite a los habitantes diversificar actividades y generar ingresos, ya que el turismo rural dinamiza la economía local, por lo que es necesaria la inversión gubernamental para aprovechar el interés de la población, retener los flujos migratorios y optimizar el uso de los recursos naturales (Sánchez y Ramírez-Valverde 2007).

En cuanto al matorral submontano, la tasa de explotación o presión hacia los árboles es probablemente igual a la de recuperación, por lo que no se observa un aumento en la cobertura (Chapa-Bezanilla *et al.*, 2008). En consecuencia, el matorral submontano persistió entre años debido a que la localidad ha sido objeto de programas públicos de regulación y planeación del uso de agostaderos para la ganadería extensiva (Guerrero-García y Pereznegron-Pereznegron 2017). Esto permite la sustentabilidad de los agostaderos, ya que estos programas excluyen áreas con fuerte presión pastoril y diversifican actividades generadoras de ingresos y emigración de sus habitantes. Por lo tanto, el éxito en el buen uso y ordenamiento de los agostaderos es sinónimo de un gran compromiso de los propietarios. Un ejemplo se ha documentado en el estado de Oaxaca, México, donde se decidió parcelar el agostadero y dar un manejo equitativo y rotativo sobre los predios pertenecientes a esta vegetación, lo que incrementó la producción, los inventarios ganaderos y mejoró las condiciones (Negrete-Sánchez *et al.*, 2016). Otros experimentos en México han demostrado que la exclusión en los agostaderos comunales ha expresado una reducción en la pérdida de suelo por debajo de los niveles permisibles, por lo que se sugiere dejar o descansar áreas de 0.5 km² distribuidas en todo el agostadero de acuerdo con los productores, y posteriormente, aplicar el uso rotacional del recurso (Pérez-Serna y Echavarria-Cháirez 2002). Medidas similares se pueden aplicar en otros agostaderos de México para realizar un manejo sustentable ya que se identificó áreas donde la presión hacia el agostadero es evidente. Apoyando lo anterior, se recomienda que las áreas con mayor presión de pastoreo podrían ser reducidas o eliminadas periódicamente, permitiendo que las poblaciones de arbustos o plantas suculentas florezcan, desarrollen frutos y formen semillas, aumentando así las posibilidades de regeneración de la vegetación (Riginos y Hoffman 2003).

El pastoreo rotacional incrementa el número de especies consumidas por el ganado; por el contrario, las especies vegetales dentro de las familias botánicas Gramineae, Compositae, Cactaceae y Fabaceae son reconocidas como las más consumidas por los herbívoros durante el pastoreo continuo (Echavarría-Cháirez *et al.*, 2007). En este estudio, fue posible estimar el proceso de cambios en los agostaderos a través del tiempo e identificar áreas de persistencia o recuperación. Por lo tanto, el presente trabajo apoya el enfoque de tener un pastoreo controlado dentro de los pastizales, lo que permitirá adaptar la carga animal, los periodos que los animales pueden permanecer en cada área, así como las características y

periodos de crecimiento de las principales especies forrajeras. Además, identificar el grado de perturbación y el tiempo de recuperación de las áreas de agostadero, como se realizó en este estudio, apoya el modelo probabilístico sobre la susceptibilidad y sensibilidad a la desertificación en diferentes partes del mundo (Oussedik *et al.*, 2003; Chapa-Bezanilla *et al.*, 2008). En este sentido, las áreas dentro de los sitios de evaluación que persistieron como agostaderos constantes podrían considerarse como áreas mínimamente susceptibles o conservadas con una cobertura arbórea bien desarrollada (Al-bukhari *et al.*, 2018). Las observaciones de campo confirman que los árboles y arbustos, principalmente del género *Prosopis*, proporcionan una fuente importante de alimento para el ganado y sustento para algunas familias de las localidades mediante la cosecha de sus frutos (Salamani *et al.*, 2013), de ahí la necesidad de la conservación y permanencia de estas áreas. Estos procesos de sucesión y colonización de ciertas especies están en función del tiempo, ya que las características de dispersión de semillas difieren dependiendo de la estrategia reproductiva intrínseca y los patrones de motilidad (Antoniadou *et al.*, 2019). Por lo tanto, se reconoce que se requieren análisis futuros dentro de las áreas de estudio para caracterizar la composición vegetal de los parches sucesionales así como determinar su asociación con otros factores ambientales.

7.1.2 Categorías sucesionales en áreas de agostaderos

Diversos estudios han demostrado la degradación de los agostaderos causada por el pastoreo excesivo o continuo (Enríquez-Quiroz *et al.*, 2021; Han *et al.*, 2008; Fuls 1992). Sin embargo, durante el periodo de evaluación, se identificó que la menor superficie de agostaderos se presentó en el año 2000 para la mayoría de los sitios, y su cobertura comenzó a aumentar a partir de 2005, aunque no se observó una tendencia lineal. En cambio, se encontró que la vegetación con mayor dosel y altura, como el bosque de pino-encino, el bosque de táscate y el matorral submontano, fueron declinando en cobertura, mientras que las áreas de agostaderos que incluyen matorral xerófilo y vegetación secundaria aumentaron; además, las áreas antropogénicas también tendieron a declinar, dando lugar a nuevas áreas de pastoreo. De hecho, estudios a nivel local indicaron que las comunidades con vegetación secundaria, matorral, chaparral o matorral xerófilo, consideradas en este estudio como agostadero, muestran una mayor tasa de aumento de su superficie (Sánchez-Reyes *et al.*, 2017; Lara-Requena 2010). Conocer los cambios en la cobertura vegetal a través del tiempo en

agostaderos áridos permite monitorear las condiciones del suelo e identificar procesos de degradación del mismo (Pickup *et al.*, 1993). Estos resultados pueden tener su origen en la agricultura migratoria, en la cual se tala cualquier cobertura vegetal para la siembra de cultivos básicos hasta que el suelo pierde sus nutrientes, luego se abandona la tierra permitiendo la regeneración de la vegetación; después de varios años, los propietarios regresan y repiten el ciclo (Nair 1997). En este sentido, se observó que, a través del tiempo, no hay una recuperación de la vegetación original, sino que ésta permanece como vegetación secundaria o matorral. En México, a nivel nacional, hubo un incremento en la superficie ocupada por vegetación secundaria en el periodo 2000-2007, de la cual sólo el 10% se recuperó como vegetación primaria (Rosete-Vergés *et al.*, 2014); de la misma manera, la vegetación primaria sólo se recuperó en dos localidades del Altiplano Tamaulipeco en donde había sido fragmentada a zonas de pastoreo o actividades antrópicas. Tras el abandono de las tierras agrícolas en zonas áridas, la sucesión vegetal favorece el predominio de especies como *Prosopis glandulosa* (Contreras-Cisneros 2020), o aquellas resistentes a las drásticas condiciones del suelo (cactáceas y leguminosas leñosas), que, aunque diferentes a la vegetación primaria, incrementarían la microheterogeneidad del suelo y en consecuencia los micrositios de germinación y establecimiento de nuevas áreas agrícolas (Montaña 1992).

La estructura general de los ecosistemas áridos en el mundo se caracteriza principalmente por un mosaico de parches compuestos por varias especies e inmersos dentro de una matriz homogénea, ya sea de suelo desnudo o dominada por una sola especie (Aguilar y Sala (1999). Los remanentes de vegetación dentro de estos parches sirven como amortiguador de condiciones abióticas más severas y benefician el establecimiento y desarrollo de plántulas (Maestre *et al.*, 2003). De ahí la importancia de las alteraciones observadas dentro de las áreas de agostadero en crecimiento de las localidades estudiadas, que, aunque probablemente dominadas por una especie, contribuyen al funcionamiento del ecosistema. Además, los espacios abiertos generados en las áreas de agostadero están reemplazando pastos por arbustos espinosos ampliamente espaciados o suelo desnudo (Bestelmeyer *et al.*, 2005; Browning *et al.*, 2011) en los que prevalecerán especies de reciente establecimiento. Por otro lado, los parches o mosaicos formados a lo largo del tiempo en los sitios de estudio son trascendentales ya que permitirían la recuperación de otros tipos de vegetación. Tal es el caso

del bosque táscate y el matorral submontano, que, de acuerdo con los análisis realizados, fueron las categorías más afectadas.

Por lo tanto, aunque la fragmentación resultó en el desarrollo de más áreas de pastizales como se mencionó anteriormente, también es cierto que tales fenómenos modificarían las condiciones ambientales y la función del ecosistema al alterar el régimen hidrológico, el microclima y las propiedades del suelo (Forman 1994). Asimismo, la fragmentación de hábitats en parches separados conduce a la reducción de poblaciones, intercambios y procesos migratorios, así como a la pérdida o desplazamiento de la biodiversidad (Turner 1996; McIntyre 1995; Skole y Tucker 1993). Es probable que la fragmentación observada en los tipos de vegetación a lo largo del tiempo tenga efectos negativos en las poblaciones amenazadas al modificar la dinámica de las especies (Tomimatsu y Ohara 2003). Los cambios en la cobertura terrestre original también se reflejan en la estructura espacial del paisaje, como el tamaño, la posición, el grado de aislamiento o la forma de los fragmentos (Turner y Gardner 2015; Echeverría *et al.*, 2006), lo cual es consistente con los resultados de este trabajo. El grado de fragmentación y aislamiento de la vegetación manifiesta efectos demográficos y genéticos, que contribuyen a reducir la interacción de las plantas con sus polinizadores, generando cambios microclimáticos y reduciendo la heterocigosidad, afectando finalmente la viabilidad de una población en el futuro (Tomimatsu y Ohara 2003).

Sin duda, las áreas evaluadas en este estudio se encuentran en un claro proceso de fragmentación y la tendencia va en aumento. Con el desarrollo de nuevas áreas de agostadero, los parches de vegetación original se hacen más pequeños y aislados. Las especies invasoras surgen como un problema para la conservación de las plantas nativas, por lo que se recomienda inducir la polinización en las especies originales (Gigord *et al.*, 1999). Además, es importante incrementar la conexión entre fragmentos, ya que esto puede mejorar las posibilidades de supervivencia de las especies en el tiempo (Piessens *et al.*, 2005). Por lo tanto, la investigación sobre cambios en el uso del suelo y categorización sucesional realizada aquí podría ser un modelo y una herramienta eficiente para tomar acciones urgentes y gestionar mejor las áreas de pastoreo del Altiplano Tamaulipeco. Además, es útil para la evaluación de los cambios en las áreas determinadas en el paisaje, como lo sugieren algunos autores (Lausch y Hertzog 2002; Cayuela *et al.*, 2006).

7.1.3 Uso de categorías sucesionales como propuesta para la delimitación de áreas de exclusión, restauración y rotación de agostaderos en el Altiplano Tamaulipeco

De acuerdo con los resultados observados y la literatura referenciada en este trabajo, se espera que el presente estudio sirva como evidencia para el manejo sustentable de los agostaderos y como base para una planificación seria en el manejo sustentable del pastoreo continuo a nivel local y nacional. A través de la categorización y el análisis sucesional, se encontraron áreas que persistieron como agostaderos constantes durante 47 años, mientras que otras tuvieron diferentes tiempos de recuperación, o incluso un proceso de transición desde otros tipos de vegetación como pino-encino, matorral submontano o bosque de táscate. Una primera sugerencia es que estas áreas sean excluidas del pastoreo, ya que este enfoque ha demostrado reducir la pérdida de suelo (Pérez-Serna y Echavarría-Cháirez 2002; McCalla *et al.*, 1984). Además, las áreas de exclusión de pastoreo después de 12 años favorecen la restauración de los agostaderos al aumentar el contenido de carbono y nitrógeno tanto en la biomasa como en el suelo (Chen *et al.*, 2012). El tamaño del área excluida dependería del resultado del análisis, pero principalmente debería ser una iniciativa de los propietarios y el gobierno, si se respeta lo anterior, se debe buscar restaurar las áreas con mayor vulnerabilidad. Estas áreas deben ir acompañadas de prácticas de restauración ecológica como la forestación de especies nativas con obras de conservación de suelos y humedad (Keenleyside *et al.*, 2014). Esto podría lograrse con plantaciones de especies de uso múltiple, principalmente forrajeras, como el nopal (*Opuntia* sp.), el maguey (*Agave* sp.), y gramíneas para zonas áridas y semiáridas (Ramírez-Cervantes 2005).

En este sentido, se recomienda que las áreas destinadas al pastoreo continuo migren a una estrategia rotacional, ya que se considera que el pastoreo rotacional y de descanso tiene beneficios ecológicos y socioeconómicos (Teague *et al.*, 2015); por ejemplo, mejor control, uso más uniforme de la vegetación y pastoreo menos selectivo en comparación con el pastoreo continuo o tradicional. Esto da como resultado la conservación de parches y especies deseables, se podría mantener el vigor de las plantas, aumentar la abundancia y cobertura de especies perennes y aumentar la diversidad vegetal (Teague *et al.*, 2013). Es necesario señalar que, a mayor escala, el pastoreo continuo se concentra cerca de los cuerpos de agua, lo que aumenta la presión de pastoreo sobre los parches de vegetación que representan las etapas iniciales del deterioro de los agostaderos (Fuls 1992). Esto se menciona ya que existen

investigaciones que contradicen los beneficios del pastoreo rotacional sobre el pastoreo continuo (Briske *et al.*, 2008).

En la actualidad, las tendencias globales muestran una disminución en la biodiversidad, aun con un incremento en el número de áreas protegidas (Butchart *et al.*, 2010), así como una reducción significativa en los bosques templados y tropicales, originando nuevas áreas de matorral y vegetación secundaria ((Sánchez-Reyes *et al.*, 2017), como los hallazgos de este trabajo. Con estos argumentos, se sugiere, ya sea a nivel experimental o como políticas públicas de gobiernos locales, estatales y nacionales, el manejo rotacional del pastoreo en los agostaderos del Altiplano Tamaulipeco. Este enfoque puede extenderse a México y otros países también, ya que varios estudios en ambientes áridos y semiáridos a nivel mundial han mostrado resultados positivos del pastoreo rotacional sobre los efectos del pastoreo continuo en términos de riqueza o diversidad vegetal (Chillo, *et al.*, 2015; Odadi, *et al.*, 2017). Se considera que, bajo las condiciones relacionadas con los tipos de vegetación, tipos de suelo, nivel de degradación y/o fragmentación, se puede iniciar el proceso hacia el manejo de agostaderos bajo pastoreo rotacional. Actualmente, las herramientas tecnológicas han permitido conocer la historia de los cambios de uso y cobertura del suelo a través del tiempo (Gaffney *et al.*, 2021); estas podrían ser utilizadas para localizar áreas con regímenes de pastoreo continuo y redistribuirlas. Para ello, es importante priorizar las localidades de agostaderos mexicanos dentro de áreas naturales protegidas, seguido de sus sectores aledaños y finalmente las áreas sin protección ambiental pero mayoritariamente degradadas por el pastoreo continuo. Asimismo, se sugiere iniciar los procesos de rotación en las áreas con menor tiempo de recuperación y continuar paulatinamente con las localidades con mayor tiempo de recuperación y sucesión. Tener el control y gobernanza de estas áreas en México es de gran importancia, ya que será exitoso para la restauración paulatina del agostadero y sus áreas de vegetación adyacente. Los resultados del pastoreo rotacional como alternativa de manejo al pastoreo continuo o tradicional parecen promisorios para mantener la diversidad de la vegetación en sistemas semiáridos (McDonald *et al.*, 2019). Estrategias similares también son relevantes en zonas con altos índices de pobreza y/o con bajo bienestar humano en las que sus habitantes dependen principalmente de los servicios que brindan los ecosistemas, incrementando así la presión sobre los agostaderos (DOF 2022; INEGI 2022). Con base en lo anterior y con la certeza de que el análisis de imágenes satelitales permite

conocer la historia aproximada de los procesos de sucesión o transición de las áreas de pastoreo, sujetas al pastoreo continuo, se sugiere replicar el método en áreas con el mismo enfoque productivo. Esto permitirá comprender y comparar los resultados y sumar a la propuesta de adecuación de las áreas de pastoreo a pastoreo rotacional y de descanso, con áreas de exclusión.

7.2 Producción de Biomasa

7.2.1 Productividad en el forraje de *Opuntia ficus-indica* Mill. (L.)

El tratamiento Variedad Villanueva con una densidad de 8 plantas por m² (80 000 ha-1) y 35 kg por m² (350 t/ha-1) de fertilizante orgánico (6-V0835), es el que produjo la mayor cantidad de biomasa (seca 4.16 kg/ms/m²-41.6 t/ha-1) y fresca 41 kg/mf/m² – 410 t/ha-1), seguido de la variedad Copena V-1 con una densidad de 12 plantas por m² (120 000 ha-1) y 35 kg por m² de fertilizante orgánico con una producción de biomasa seca de 4.05 kg/ms/m² (40.5 ms/t/ha-1) y de biomasa fresca 37 kg/mf/m² (370 mf/t/ha-1). En este sentido, el uso de fertilizante orgánico responde de mejor manera respecto a la fertilización química para cultivo del nopal (*Opuntia ficus-indica*) (Méndez-Gallegos y Martínez-Hernández, 1988; Santos *et al.*, 1996). De acuerdo con Inglese (2018), la interacción que existe entre la dosis de fertilización, la densidad de la plantación y las condiciones agroecológicas, a mayor densidad, la necesidad de fertilizante será más. En este sentido, se observó que esta hipótesis se cumple ya que en el estudio se comprueba que en el tratamiento 6 la densidad es menor respecto al tratamiento 5 y con la misma aplicación de fertilizante. El aumento de número de cladodios permite obtener altos rendimientos, pero está estrechamente relacionado con la disponibilidad de nutrientes (Inglese *et al.*, 1995). Ante ello, en este trabajo se comprobó la menor producción de biomasa en dosis de fertilizante iguales, pero a una densidad mayor. Estos resultados son similares a los reportados por Junior *et al.*, (2013) en donde encontraron que el aumento en la población de plantas (160 000 plantas ha-1) no aumenta el rendimiento de la producción de materia seca. El autor señala que los niveles de nutrientes aplicados a través del estiércol no están en la cantidad necesaria para los cultivos densamente poblados. De tal forma que el aumento gradual de fertilizante orgánico (en este caso estiércol), tendrá un efecto positivo en los rendimientos productivos de nopal forrajero, lo cual estará en función con la densidad poblacional (Fateminick *et al.*, 2023). Los rendimientos productivos obtenidos son diferentes a los de otros autores. Podemos citar a Salazar-Sosa, *et al.*, (2017)

quien con una dosis de fertilización con estiércol solarizado de 60 t/ha-1 obtuvieron una producción máxima de 77.6 t/ha-1 con una densidad de plantas de 13 323 ha-1, esto bajo un sistema de producción en condiciones de secano; Salazar-Sosa, *et al.* (2010), obtuvieron 35.6 t/ha-1 con el tratamiento de 60 t/ha-1 de dosis de estiércol. En cambio, Martínez *et al.*, (2009) con una aplicación de 100 t ha-1 de estiércol bovino como fertilizante lograron 74.3 t/ha-1 de forraje verde. El cultivo de *Opuntia* bajo condiciones de riego puede obtener un rendimiento de 1.3 kg/ms/m²/año, pudiendo alcanzar hasta 100 ton/h/ año (Acevedo *et al.*, 1983). De acuerdo con Gutiérrez *et al.*, (2007) si se da un buen manejo del cultivo nopal forrajero se pueden producir de 200 a 400 t/ha-1 de forraje fresco y para el caso de este estudio hasta 410 t/ha-1 en la variedad Villanueva. Sin embargo, esta producción puede incrementarse al modificarse el diseño de plantación y fertilización (García de Cortázar y Nobel, 1986).

Los *Opuntia* responden favorablemente a las altas concentraciones de estiércol y altas densidades poblacionales, incrementando de manera significativa la producción de biomasa (Reveles *et al.*, 2010). Las concentraciones altas en la aplicación de nitrógeno favorecen la producción alta de biomasa en *Opuntia* (Murillo-Amador *et al.*, 2005)

En contraste en algunos trabajos con altas dosis de estiércol bovino (100, 200, 400, y 600 t/ha-1) en nopal verdura el rendimiento en número de nopalitos resulta estadísticamente significativo en la dosis de 600 t/ha-1. De la misma manera Murillo *et al.*, (1999) evaluaron cinco variedades de nopal verdura (Otumba, Milpa Alta, Regional, Durango 1 y Durango 2) con tres dosis de estiércol bovino (0, 400 y 800 t/ha-1) y encontraron que todas las variables morfológicas aumentan conforme aumenta la dosis de estiércol y la variedad regional con la dosis máxima es la que mayor rendimiento brinda en la producción de nopalitos.

Por otro lado, en la vegetación silvestre de *Opuntia*, los rendimientos varían de 25 a 125 t/ha-1, dependiendo de la especie, el vigor de las plantas, las condiciones del clima, la fertilidad del suelo y el sistema de manejo en el agostadero. Aunque, estos rendimientos son por que el 75-80 % de biomasa aérea es cosechada. Sin embargo, el periodo de recuperación depende del régimen de lluvias y la intensidad del uso (López-García, *et al.*, 2003).

Ante este escenario el cultivo del nopal forrajero representa una opción efectiva en costos para proveer alimento al ganado (Dubeaux *et al.*, 2015). Ante los niveles de productividad obtenidos en este trabajo es posible producir suficiente forraje verde para sostener alrededor

de 37 unidades animal por año. Con plantaciones en espacios pequeños manejados intensivamente es posible producir alimento y reducir la presión en los agostaderos con un pastoreo excesivo (Inglese 2018).

7.2.2 Indicadores morfológicos en *Opuntia* Forrajera

La evaluación sobre la producción de biomasa considerando los datos biométricos, así como el número de cladodios por planta y por m² han permitido evaluar el comportamiento productivo de diferentes poblaciones de variedades de *Opuntia* (Caloggero y Parera 2004; Reis *et al.*, 2016). Los parámetros de crecimiento número de cladodios, largo, ancho, espesor, área foliar o área del cladodio y altura de la planta son trascendentes en cualquier estudio, esto debido a que en este y otros estudios, estas variables han mostrado una correlación positiva con la producción de biomasa fresca y seca (Neder *et al.*, 2013), aunque se pueden ver influenciados por las condiciones ambientales (Alves *et al.*, 2016). Estos descriptores morfológicos se pueden considerar como instrumento para evaluar la diversidad genética de *Opuntia* (Adli *et al.*, 2017). A medida que se incrementa la dosis de estiércol este refleja un aumento significativo en el número de nopalitos por planta, el largo y el ancho (Fierro *et al.* 1999). El incremento de tamaño de los cladodios son efectos inmediatos de la fertilización, lo cual presenta una gran ventaja para la producción de forraje. Sin embargo, en el caso de la variable altura de la planta esta estará en función de la especie y la variedad de *Opuntia*, ya que se ha observado que presenta mejor desempeño en algunos cultivos respecto a otros (*Nopalea cochenillifera* vs *Opuntia undulata*) lo cual se relaciona con las características genéticas y morfológicas del nopal (da Silva, *et al.*, 2016). Las diferencias morfológicas entre nopales de la misma especie, pero de diferentes variedades o poblaciones responden de diferente forma a la humedad, temperatura, luz, tipo de suelo y elementos de suelo (Lozano 2011) y como se comprobó en este estudio responden a la aplicación de fertilizante en diferentes dosis y a la densidad poblacional. Por lo que, la aplicación con dosis altas en la fertilización de *Opuntia* forrajera mejorará de manera significativa el desarrollo morfológico y el rendimiento en la producción de biomasa (da Silva, *et al.*, 2016).

Además, se encontró que el estrés bajo condiciones de secano y sin fertilización reduce de manera significativa el tamaño de los cladodios incluido, el largo, ancho, espesor y además el número de nopales por planta. Estos resultados son similares a los encontrados por Scalisi *et al.*, (2016) quienes demostraron que el estrés por sequía reduce el contenido relativo de

agua, el espesor, la acumulación de ácido málico, la conductancia estomática, el tamaño y las tasas decrecimiento de los cladodios en desarrollo en un experimento bajo invernadero. En este sentido los *Opuntia* tras pasar por estrés hídrico también reducen la fotosíntesis de los cladodios individuales, esto se atribuye a las reducciones en el contenido relativo de agua, el espesor del parénquima y el contenido de clorofila (Pimienta-Barrios *et al.*, 2007). Es notable estas alteraciones en la acumulación de biomasa en el nopal forrajero, como en este estudio vemos que el cultivo, sin ningún manejo los rendimientos productivos se reducen significativamente. Esto sugiere que, en casos de déficit hídrico, con densidades altas y sin fertilización en las dos variedades de *Opuntia ficus-indica* presentan reducciones significativas en el criamiento del cladodio. De acuerdo con, Dubeux-Junior *et al.* (2010) las diferencias observadas en los cultivares estudiados pueden estar asociadas a su peculiar estructura morfológica que se aprecia en el ancho y grosor de cada cladodio.

En este sentido en los seis tratamientos evaluados se encontró que las variaciones morfológicas permiten elegir aquella variedad que mejor convenga a las necesidades y disponibilidad de capital como es el recurso agua y la fertilización. Ya que el tratamiento sin agua y sin fertilización permiten producir forraje confirmando la tolerancia de *Opuntia* al estrés hídrico. Estos resultados son similares a los reportados por Bacarrillo-López, *et al.*, (2021) en donde la producción bajo estrés hídrico puede ser utilizadas sin que presente impactos negativos en el crecimiento del cladodio que es la unidad básica en la producción de forraje. En el presente estudio cualquiera de las dos variedades (Copena V-1 y Villanueva) puede ser utilizada bajo estos tratamientos. En cambio, bajo condiciones de humedad favorable y fertilización alta, la variedad Villanueva con el tratamiento 8/m²/35 kg de fertilización orgánica es la que, en términos morfológicos, peso fresco y seco es la mejor opción para la producción de forraje de manera intensiva.

Finalmente, se resalta la importancia de los análisis multivariados en este caso el análisis de funciones discriminantes, el cual ha permitido la valoración en conjunto de múltiples variables y su comportamiento respecto a los tratamientos evaluados. Estas técnicas de agrupamiento son relevantes para reducir los atributos cualitativos de los datos morfológicos y en la discriminación de identificación de rasgos entre las diferentes variedades de *Opuntia ficus-indica*. Algunos estudios con análisis de componentes principales demuestran que el área del cladodio, el número de cladodios, la altura, el ancho y el espesor del cladodio son

variables que determinan las mejores características de las plantas de Nopal (de Sousa-Melo, *et al.*, 2024). En esta investigación se encontró que el peso fresco y seco de los cladodios también permiten seleccionar a aquellas variedades que responden de la mejor manera a los tratamientos evaluados para fines productivos en forraje.

7.2.3 Estacionalidad productiva en *Opuntia ficus indica*

Los resultados obtenidos en este estudio indican que el riego moderado en el cultivo del nopal es una alternativa para la producción de forraje en zonas en donde se cuente con este recurso. Se encontró que es posible producir forraje durante todo el año, aunque la producción disminuye y aumenta conforme cambian las estaciones del año. En este sentido la estacionalidad en el cultivo de nopal está estrechamente relacionada con las características ambientales. Algunos autores reconocen que existen tres temporadas de producción esto (Rivera Martínez, *et al.*, 2015).

Una de las características que brinda este cultivo es que en las diferentes estaciones del año proporcionan una fuente alternativa de agua barata y ecosostenible y puede asociarse con forrajes secos para elaborar raciones alimenticias con alto contenido de proteína (Maduro-Dias, *et al.*, 2022). Algunos parámetros morfológicos se ven afectados de acuerdo con la época del año, Pérez-Sánchez, *et al.*, (2015) encontraron que en temporadas de estiaje el largo del cladodio aumenta y en temporadas de lluvia incrementa el ancho. En este estudio se observó que el número de cladodios es mayor en el verano y primavera, sin embargo, el largo, ancho y área foliar son mayores en otoño. Estos resultados son similares a los reportados por Homrani-Bakali (2013) en donde el mayor periodo de crecimiento es en otoño seguido del periodo de primavera. En relación con ello, las diferencias morfológicas del cultivo de *Opuntia ficus indica* de diferentes poblaciones se ven afectados por la humedad, luz, tipo de suelo y nutrientes (Hernández, *et al.*, 2011).

En la presente investigación se observó claramente el impacto positivo de las precipitaciones en el desarrollo y productividad del cultivo, así como la acumulación de agua, encontrándose los valores más altos en otoño. Sin embargo, el uso de riego deficitario da como respuesta positiva el crecimiento y productividad de *Opuntia* forrajera (Bezerra, *et al.*, 2014). Algunos estudios han demostrado que los tratamientos de riego y secano aumentan la productividad, demostrando la viabilidad de invertir en riego para *Opuntia* forrajera y el aumento en los ingresos económicos (Bezerra, *et al.*, 2024).

De acuerdo, a lo observado el riego después de la siembra es uno de los factores que contribuyen a tener éxito en la plantación y producción de forraje en *Opuntia ficus indica* (Var. Villanueva y Var. Copena). En este estudio se comprobó que bajos los tratamientos aplicados, el riego usado es suficientes para mantener al cultivo y lograr producir alta producción de biomasa. La tolerancia de las plantas a la sequía es relevante, ya que pueden sobrevivir con solo 200 mm de precipitación anual (Acevedo *et al.*, 1983).

8. Conclusiones

Los resultados presentados constituyen una primera aproximación a los cambios en la cobertura y uso del suelo en el Altiplano de Tamaulipas, México. Estas áreas, adyacentes a áreas naturales protegidas, albergan una biodiversidad única, propia de cada tipo de vegetación, con un alto número de especies endémicas y de importancia ecológica. Los hallazgos obtenidos pueden extrapolarse a otras zonas áridas y semiáridas bajo manejo ganadero en sistemas de pastoreo continuo, lo que hace que esta información sea crítica para el manejo sustentable de los agostaderos. Los análisis muestran una expansión de las áreas de agostaderos, lo que ha comprometido tipos de vegetación con mayor dosel y altura, favoreciendo la aparición de matorral y vegetación secundaria. Estos resultados pueden servir como base para promover la implementación de sistemas de pastoreo rotacional en agostaderos, fomentando la coexistencia entre ganado y fauna silvestre. En particular, se busca beneficiar las áreas adyacentes a áreas naturales protegidas y aquellas con mayores niveles de degradación y fragmentación, con el objetivo de mitigar los impactos negativos sobre la vegetación y la biodiversidad local.

El historial de cambios en las áreas analizadas permitió delimitar el tiempo de sucesión para el agostadero que este estudio considerado el matorral xerófilo y vegetación secundaria, que, aunque la sucesión no fue lineal hay un porcentaje importante en el incremento de km² de esta área. Por lo que, resaltamos que la cobertura de uso de suelo y vegetación en el Altiplano Tamaulipeco está constituida principalmente por áreas de agostadero, reduciendo tipos de vegetación de mayor dosel y altura y actividades antropogénicas. Creemos que, aunque encontramos dos áreas sin cambios aparentes en cuanto a cobertura y uso de suelo, es necesario realizar investigaciones para resolver la hipótesis de que esto solo fue posible por la intervención de programas gubernamentales e incremento de actividades ecoturísticas.

Es de importancia realizar investigaciones sobre el proceso de adaptación de las especies de fauna silvestre con el pastoreo continuo, así como la diversidad de plantas en las áreas manejadas bajo este sistema de pastoreo, medir las áreas susceptibles y pérdida de suelo, que ayuden a construir un programa robusto de pastoreo rotacional a nivel local y expandirlo. Los poseedores de las áreas comunales a lo largo del tiempo han recibido múltiples servicios ecosistémicos principalmente económicos, en donde cada dueño percibe beneficios individuales por la comercialización del ganado. Con este trabajo, se busca que los poseedores de las tierras enfrenten los retos de los agostaderos sometidos a pastoreo continuo, y que se puedan manejar de manera sostenible, bajo un enfoque individual-comunidad y crear programas de lo local a lo regional-estatal, nacional y global. En donde, se puedan lograr beneficios socioeconómicos y ecológicos. Puesto que existe un gran avance en la era digital, es posible ir acercando estas áreas del conocimiento a los propietarios y encargados del aprovechamiento y manejo de las grandes áreas de agostadero, a través de la creación de aplicaciones móviles, utilizando las variables aquí expuestas. Los materiales y métodos utilizados en este trabajo son de fácil uso y manejo a fin de ser replicados en otras áreas y realizar monitoreos constantes a lo largo del tiempo, a fin de estar midiendo o evaluando el impacto o efectividad de diferentes estrategias o prácticas desarrolladas para la conservación y sostenibilidad de las áreas destinadas al agostadero, sin comprometer los distintos tipos de vegetación.

En este sentido, el cultivo de nopal forrajero permite una productividad 60 a 75 veces mayor que los agostaderos naturales. Por lo que el cultivo de manera intensiva en áreas pequeñas permite disminuir la presión sobre las áreas de pastoreo naturales. Las características morfológicas de *Opuntia Ficus-indica* lo convierten en una especie perenne potencial que mejorara la disponibilidad de forraje en zonas con periodos de estiaje largo. El aumento promedio de temperatura y precipitaciones dispersas afectan profundamente la producción natural del forraje y *Opuntia* forrajera ha demostrado por sus características productivas ser un cultivo alternativo en las zonas áridas. La variabilidad entre los tratamientos evaluados permite seleccionar a cualquiera de las variedades estudiadas, ya que con la fertilización adecuada brindan altos rendimientos productivos y son atractivas para que los clones de este cultivo sirvan para nuevas plantaciones.

Sin embargo, la aplicación de fertilización adecuada en las variedades Villanueva o Copena V-1 deben ser en las dosis adecuadas ya que como aquí se demostró permiten incrementar de manera progresiva la producción de biomasa fresca y seca a lo largo de los periodos y estaciones del año. Aunque, en la producción en el número de cladodios si está determinada por la variedad (Copena V-1) que, por la aplicación de fertilizante, por otro lado, en la variedad Villanueva las variables biométricas (largo, ancho y peso) si determinan la producción de biomasa de acuerdo con las dosis aplicadas. Con estos datos sobre las características y variabilidad en los tratamientos evaluados es posible seleccionar al modelo que mejor se adapte a las condiciones agroecológicas de los productores. Los resultados encontrados indican que cualquiera de los cuatro tratamientos con aplicación de estiércol produce materia seca significativa y comparable con otros tratamientos evaluados, sin embargo, el mejor fue la variedad Villanueva con 35 kg de estiércol y 8 plantas por m². Esto permite realizar planteamientos sobre sistemas de producción intensivo, que no solo permitan aumentar los rendimientos sino también la calidad. El estiércol ovino-caprino es una opción altamente recomendada como fertilizante en la producción de nopal forrajero de manera intensiva.

Finalmente, se recomienda realizar estudios sobre los problemas fitosanitarios y la mejor manera de prevenir y controlar las plagas que afectan al cultivo que en este estudio solo se observaron dos (Gusano telarañero-*Loxomorpha flavidissimalis* y Cochinilla silvestre o grana-*Dactylopius opuntiae*), así como el impacto del incremento de forraje a través de plantaciones nopal y la mejorara en las áreas de agostadero. También es importante evaluar los impactos en la producción ganadera, si aumentan o disminuyen los rendimientos productivos y si los costos de producción disminuyen o aumentan.

9. Literatura Citada

- Abbot, C.E. (1945). The toxic gases of lime-sulfur. *Journal of Economic Entomology*, 38(5), 618-620.
- Acevedo, E., Badilla, L. y Nobel, P.S. (1983). Water relations, diurnal acidity changes, and productivity of a cultivated cactus, *Opuntia ficus-indica*. *Plant Physiology*, 72: 775-780.

- Acutis, M., Alfieri, L., Giussani, A., Provolo, G., Di Guardo, A., Colombini, S., Bertoncini, G., Castelnuovo, M., Sali, G., Moschini, M., Sanna, M., Perego, A., Carozzi, M., Chiodini, M. E. y Fumagalli, M. (2014). ValorE: An integrated and GIS-based decision support system for livestock manure management in the Lombardy region (northern Italy). *Land use policy*, 41, 149-162.
- Adli, B., Boutekrabt, A., Touati, M., Bakria, T., Touati, A. y Bezini, E. (2017). Phenotypic diversity of *Opuntia ficus indica* (L.) MILL. in the Algerian steppe. *South African Journal of Botany*, 109, 66-74.
- Aguilar, M.R. y Sala, O.E. (1999). Patch structure, dynamics and implication for the functioning of arid ecosystems. *TREE*, 14, 273–277. [https://doi.org/10.1016/s0169-5347\(99\)01612-2](https://doi.org/10.1016/s0169-5347(99)01612-2).
- Al-bukhari, A., Hallett, S. y Brewer, T. (2018). A review of potential methods for monitoring rangeland degradation in Libya. *Pastoralism*, 8, 1–14. <https://doi.org/10.1186/s13570-018-0118-4>.
- Alcalá-Galván, C.H., Barraza-Guardado, R.H., Álvarez, F.A. y Rueda-Puente, E.O. (2018). Uso sustentable de agostaderos y el sistema vaca-cría en el Noroeste de México. *Agron. Mesoam.*, 29, 433–447. <https://doi.org/10.15517/ma.v29i2.29185>.
- Alejandro, O.M., Rubio-Tabares, E., Perez-Eguía, E., Zaragoza-Martínez, L. y Rodríguez-Galván, G. (2016). Los Recursos caprinos de México. En *Biodiversidad Caprina Iberoamericana*, Bogotá; Ediciones Universidad Cooperativa de Colombia: New York, NY, USA; pp. 95–107.
- Allred, W.B., Creutzburg, K.M., Carlson, C.J., Cole, J.C., Dovichin, M.C., Duniway, C.M., Jones, O.M., Maestas, D.J.; Naugle, E.D., Nauman, W.T., et al. (2022). Guiding principles for using satellite-derived maps in rangeland management. *Rangelands*, 44, 78–86. <https://doi.org/10.1016/j.rala.2021.09.004>.
- Alves, F. A. L., de Andrade, A. P., Bruno, R. D. L. A. y dos Santos, D. C. (2016). Study of the variability, correlation and importance of chemical and nutritional characteristics

- in cactus pear (*Opuntia* and *Nopalea*). *African Journal of Agricultural Research*, 11(31), 2882-2892.
- Anaya-Pérez M. A. y R. Bautista-Zane. 2008. El nopal forrajero en México: del siglo XVI al siglo XX. *Agricultura, Sociedad y Desarrollo*. 167-183.
- Antoniadou, C., Voultsiadou, E. y Chintiroglou, C.C. (2019). Succession and Colonization. *Encycl. Ecol.*, 2, 369–378. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-409548-9.10594-9>.
- Arba, M. (2020). The potential of cactus pear (*Opuntia ficus-indica* (L.) Mill.) as food and forage crop. *Emerging research in alternative crops*, 335-357.
- Arreola-Nava, M.E., Vázquez-Castellanos, J.L. y González-Castañeda, M.E. (2000). Geographical factors in the epidemiology of intoxication by *Karwinskia (tullidora)* in Mexico. *Cad. Saúde Pública*, 16, 255–260. <https://doi.org/10.1590/S0102-311X2000000100028>.
- Arriaga, L. (2009). Implicaciones del cambio de uso de suelo en la biodiversidad de los matorrales xerófilos: Un enfoque multiescalar. *Investig. Ambient.*, 1, 6–16.
- AU-IBAR. (2015). *Livestock Development Strategy for Africa (LiDeSA) 2015–2035*; Department of Rural Economy and Agriculture: Nairobi, Kenya African Union; pp. 1–85, ISBN 978-9966-077-30-1.
- Bacarrillo-López, R., Pedroza-Sandoval, A., Inzunza-Ibarra, M. A., Flores-Hernández, A. y Macías-Rodríguez, Francisco J. (2021). Productividad de forraje de variedades de nopal (*Opuntia* spp.) bajo diferentes regímenes de humedad del suelo. *Ecosistemas y recursos agropecuarios*, 8(3), e2878.
- Banks, T. (2003). Property rights reform in rangeland China: Dilemmas on the road to the household ranch. *World Dev.*, 31, 2129–2142. <https://doi.org/10.1016/j.worlddev.2003.06.010>.
- Barbier, E. B. y Hochard, J. P. (2018). Land degradation and poverty. *Nature Sustainability*, 1(11), 623-631.

- Barrón, M., M 2004. Caracterización morfológica de 40 cultivares de nopal de uso hortícola del banco de germoplasma del CRUCeN-UACH. Tesis profesional URUZA-UACH. Bermejillo, Durango.
- Bestelmeyer, B.T., Trujillo, D.A., Tugel, A.J. y Havstad, K.M. (2005). A multi-scale classification of vegetation dynamics in arid lands: What is the right scale for models, monitoring, and restoration? *J. Arid Environ.*, 65, 296–318. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2005.06.028>.
- Bezerra, B. G., Araújo, J. S., Pereira, D. D., Laurentino, G. Q. y Silva, L. L. D. (2014). Zoneamento agroclimático da palma forrageira (*Opuntia* sp.) para o estado da Paraíba. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 18, 755-761.
- Bezerra, F. M. S., de Lacerda, C. F., Giroldo, A. B., Cavalcante, E. S., Michelon, N., Pennisi, G., da Silva Sales, J. R., Ingryd Nojosa Lessa, C. I., Vieira Lima, S. C. R., Bezerra Lopes, F., Gianquinto, G. y Orsini, F. (2024). Deficit irrigation of forage cactus (*Opuntia stricta*) with brackish water: Impacts on growth, productivity, and economic viability under evapotranspiration-based management. *Agronomy*, 14(7), 1445.
- Bounejmate, M., Norton, B.E., Khatib, A., Bathikh, N., Ghassali, F., Mourid, M., y Mahyou, H. (2004). Partnership for understanding land use-cover change and reviving overgrazed rangeland in Mediterranean areas: ICARDA's experience. In *Réhabilitation des pâturages et des parcours en milieux méditerranéens*, ed. Ferchichi, A. (comp.) and Ferchichi, A. (collab.), Zaragoza: CIHEAM. *Cah. Options Méditerran.*, 62, 267–283.
- Bravo, H. H. y Piña, I. (1979). Algunos Aspectos Sobre la Utilización del Nopal. México. *Cact. Succ.* XXIV 89-94 pp.
- Briske, D.D., Derner, J.D., Brown, J.R., Fuhlendorf, S.D., Teague, W.R., Havstad, K.M., Gillen, R.L., Ash, A.J. y Willms, W.D. (2008). Rotational grazing on rangelands: Reconciliation of perception and experimental evidence. *Rangel. Ecol. Manag.*, 61, 3–17. <https://doi.org/10.2111/06-159r.1>.

- Browning, D.M., Laliberte, A.S. y Rango, A. (2011). Temporal Dynamics of Shrub Proliferation: Linking Patches to Landscapes. *Int. J. Geogr. Inf. Sci.*, 25, 913–930. <https://doi.org/10.1080/13658816.2010.498789>.
- Brunson, M. (2014). Unwanted No More: Land Use, Ecosystem Services, and Opportunities for Resilience in Human-Influenced Shrublands. *Rangelands*, 36, 5–11. <https://doi.org/10.2111/RANGELANDS-D-13-00064.1>.
- Burgos, A. y Maass, J.M. (2004). Vegetation change associated with land-use in tropical dry forest areas of western Mexico. *Agric. Ecosyst. Environ.*, 104, 475–481. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2004.01.038>.
- Butchart, S.H., Walpole, M., Collen, B., Van Strien, A., Scharlemann, J.P., Almond, R.E., Baillie, J.E., Bomhard, B., Brown, C., Bruno, J., et al. (2010). Global biodiversity: Indicators of recent declines. *Science*, 328, 1164–1168. <https://doi.org/10.1126/science.1187512>.
- Caloggero, S. y Parera, C. A. (2004). Assessment of prickly pear (*Opuntia ficus-indica*) varieties and their possible planting systems. *Spanish Journal of Agricultural Research*, 2(3), 401-407.
- Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión (HCU). (2022). *Ley Agraria*; Diario Oficial de la Federación: Ciudad de México, México; pp. 1–56.
- Casas, A., y Barbera, G. (2002). Mesoamerican domestication and diffusion. *Cacti: biology and uses*, 143, 62.
- Cayuela, L., Rey-Benayas, J.M. y Echeverría, C. (2006). Clearance and fragmentation of tropical montane forests in the Highlands of Chiapas, Mexico (1975–2000). *For. Ecol. Manag.*, 226, 208–218. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2006.01.047>.
- Cervantes, R.M.C. (2002). Plantas de importancia económica en las zonas áridas y semiáridas de México. *Anais do X Encontro de Geógrafos da América Latina*; Instituto de Geografía-Universidad Nacional Autónoma de México: Ciudad de México, México; pp. 3388–3407, ISBN UNAM 970-32-0182-02.

- Chapa-Bezanilla, D., Sosa-Ramírez, J. y Alba-Ávila, A. (2008). Estudio multitemporal de fragmentación de los bosques en la Sierra Fría, Aguascalientes, México. *Madera Y Bosques*, 14, 37–51. <https://doi.org/10.21829/myb.2008.1411216>.
- Chen, Y., Li, Y., Zhao, X., Awada, T., Shang, W. y Han, J. (2012). Effects of grazing exclusion on soil properties and on ecosystem carbon and nitrogen storage in a sandy rangeland of Inner Mongolia, Northern China. *Environ. Manag.*, 50, 622–632. <https://doi.org/10.1007/s00267-012-9919-1>.
- Chillo, V., Ojeda, R.A., Anand, M. y Reynolds, J.F. (2015). A novel approach to assess livestock management effects on biodiversity of drylands. *Ecol. Indic.*, 50, 69–78. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2014.10.009>.
- CONAZA (Comisión Nacional de Zonas Áridas). (2022). Conservación y Uso Sustentable de Suelo y Agua. México. 19 de Enero de. 2015. Consultado en línea: <https://www.gob.mx/conaza/documentos/reglas-de-operacion-2015-170664> (acceso enero 2022).
- Contreras-Cisneros, A.J. (2020). Carbono orgánico en terrenos agrícolas abandonados en zonas áridas. Maestría. Tesis, Universidad Autónoma de Chapingo. Bermejillo, Durango, México.
- Cordova-Torres, A., L. Gutiérrez-Berroeta, J. R. Kawas, T. García-Gasca, A. Aguilera-Barreiro, G. Mlida, H. M. Andrade-Montemayor. (2009). El nopal (*Opuntia ficus indica*) puede ser una alternativa de suplementación para caprinos en regiones semiáridas: Efecto del tamaño o madurez de la penca en la digestibilidad in vivo y composición. VI Congreso Latinoamericano de la Asociación de especialistas en pequeños rumiantes y camélidos sudamericanos. XXIV Reunión de la AMPCA. Querétaro, México. pp 143-151.
- Corrales-Maldonado, C. G., Vargas-Arispuro, I., Vallejo-Cohén, S. y Martínez-Téllez, M. A. (2014). Deficiencia de azufre en suelos cultivables y su efecto en la productividad. *Biotechnia*, 16(1), 38-44.

- CSPCT. (2012) Plan Rector; Comité Sistema Producto Caprino de Tamaulipas: Ciudad Victoria, México; pp. 4–59.
- Da Silva, P. F., de Matos, R. M., Borges, V. E., Neto, J. D. y de Farias, M. S. S. (2016). Morphology and biomass yield of forage cactus under mineral fertilization in organic soil. *African Journal of Agricultural Research*, 11(37), 3497-3505.
- De Cortázar, V. G., y Nobel, P. S. (1992). Biomass and fruit production for the prickly pear cactus, *Opuntia ficus-indica*. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 117(4), 558-562.
- De Kock, G. C. (2001). The use of *Opuntia* as a fodder source in arid areas of Southern Africa. *FAO Plant Production and Protection Paper (FAO)*, (169).
- De la Cruz-Rock, J. L., Argüello-Zepeda, F. J. y Tello-Iturbe, A. (2009). Turismo y sustentabilidad en el Altiplano Tamaulipeco. In *En Sociedad, Conflicto y Ambiente*; Eds.; Esqueda-Walle, R.; Mendoza, L: Tamaulipas, México; pp.143–166, ISBN-13: 978-84-692-0011-7.
- De Sousa-Melo, T., de Sousa, W. H., de Farias-Ramos, J. P., Cartaxo, F. Q., da Cunha-Morais, L. K., dos Santos-Souza, T. T., de Sousa, F. A., Viana, J. A., de Oliveira, F. G., da Cruz, A. F. y Araújo, M. (2024). Multivariate techniques for analyzing morphological characteristics of cactus pear genotypes in semiarid Brazil. *Observatório de la Economía Latinoamericana*, 22(2), e3299-e3299.
- Del Pino, A., C. Repetto, C. Mori y Perdomo, C. (2008). Patrones de descomposición de estiércoles en el suelo. *Terra Latinoamericana* 26: 43-52.
- Delgado-Padierna, A.Q. (2022). Análisis del Efecto al Pastoreo en Cuatro Unidades de Producción del Altiplano Potosino. Master's Thesis, Universidad Autónoma de San Luis Potosí-Facultad de Agronomía y Veterinaria, San Luis Potosí, Mexico, November.
- Di Benedetto, A. y Tognetti, J. (2016). Técnicas de análisis de crecimiento de plantas: su aplicación a cultivos intensivos. *Revista Investigaciones Agropecuarias*. 42. 258-282.

Diario Oficial de la Federación (DOF). (2022) Secretaría de Bienestar, Decreto Por el Que se Formula la Declaratoria de Las Zonas de Atención Prioritaria Para el Año 2022, México, 29 de noviembre de. 2021. Consultado en línea: https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/684340/Zonas_prioritarias_2022.pdf (acceso agosto de 2022).

Díaz-Franco, A., Maya-Hernández, V., Álvarez-Ojeda, M. G. y De la Garza-Caballero, M. (2014). Tecnología para la producción intensiva de nopal para verdura en Tamaulipas. Investigadores del Campo Experimental Río Bravo, CIR-Noreste-INIFAP, Tamulipas, México. 29 Pp.

Djeddaoui, F., Chadli, M. y Gloaguen, R. (2017). Desertification Susceptibility Mapping Using Logistic Regression Analysis in the Djelfa Area, Algeria. Remote Sens., 9, 1031. <https://doi.org/10.3390/rs9101031>.

Donato, P. E. R., Pires, A. J. V., Donato, S. L. R., da Silva, J. A. y de Aquino, A. A. (2014). Valor nutritivo da palma forrageira ‘Gigante’ cultivada sob diferentes espaçamentos e doses de esterco bovino. Revista Caatinga, 27(1), 163-172.

Dubeux Jr, J. C. B., dos Santos, M. V. F., da Cunha, M. V., dos Santos, D. C., de Almeida Souza, R. T., de Mello, A. C. L. y de Souza, T. C. (2021). Cactus (*Opuntia* and *Nopalea*) nutritive value: A review. Animal Feed Science and Technology, 275, 114890.

Dubeux Jr, J. C. B., Dos Santos, M. V. F., De Mello, A. C. L., Vieira da Cunha, M., de A. Ferreira, M., Dos Santos, D. C. y da C. Silva, M. (2013). Forage potential of cacti on drylands. In VIII International Congress on Cactus Pear and Cochineal 1067 (pp. 181-186).

Dubeux, C. B. J., Hichem, S. B y Nefzao A. (2018). Producción y utilización de nopal forrajero en la nutrición animal. Pag-78-85. Inglese, P. "Ecología del cultivo, manejo y usos del nopal." 229 Pp.

- Dubeux, Jr, J.C.B., dos Santos, M.V.F., De Mello, A.C.L., Da Cunha, M.V., Ferreira, M. De A., Dos Santos, D.C., Lira, M. De A. y Silva, M. Da C. (2015). Forage potential of cacti on drylands. *Acta Hortic.*, 1067: 181-186.
- Dubeux-Júnior, J.C.B., Araújo-Filho, J.T., Santos, M.V.F., Lira, M.A., Santos, D.C. y Pessoa, R.A.S. (2010). Adubação mineral no crescimento e composição mineral da palma forrageira – Clon IPA-20. *Rev. Bras. de Ciênc. Agrárias*. 5(1):129-135.
- Dyksterhuis, E.J. (1949). Condition and management of rangeland based on quantitative ecology. *J. Range Manag.*, 2, 104–115. <https://doi.org/10.2307/3893680>.
- Eastman, J.R. (2012). Idrisi Selva Tutorial. Manual Version 17; Clark Labs, Clark University: Worcester, MA, USA; pp. 177–220.
- Ebrahimi, A., Milotić, T. y Hoffmann, M. (2010). A herbivore specific grazing capacity model accounting for spatio-temporal environmental variation: A tool for a more sustainable nature conservation and rangeland management. *Ecological Modelling*, 221(6), 900-910.
- Echavarría-Cháirez, F.G., Gutiérrez-Luna, R., Ledesma-Rivera, R.I., Bañuelos-Valenzuela, R., Aguilera-Soto, J.I. y Serna-Pérez, A. (2006). Influence of small ruminant grazing systems in a semiarid range in the State of Zacatecas Mexico. I Native vegetation. *Tec. Pec. Mex.*, 44, 203–217.
- Echavarría-Cháirez, F.G., Serna-Pérez, A. y Bañuelos-Valenzuela, R. (2007). Influencia del sistema de pastoreo con pequeños rumiantes en un agostadero del semiárido zacatecano: II. Cambios en el suelo. *Rev. Mex. Cienc. Pecu.*, 45, 177–194.
- Echeverria, C., Coomes, D., Salas, J., Rey-Benayas, J.M., Lara, A. y Newton, A. (2006). Rapid deforestation and fragmentation of Chilean temperate forests. *Biol. Conserv.*, 130, 481–494. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2006.01.017>.
- Endelman, J. B., Reeve, J. R. y Drost, D. T. (2010). A new decay series for organic crop production. *Agronomy journal*, 102(2), 457-463.

- Enríquez-Quiroz, J.F., Esqueda-Esquivel, V.A. y Martínez-Méndez, D. (2021). Rehabilitación de praderas degradadas en el trópico de México. *Rev. Mex. De Cienc. Pecu.*, 12, 243–260. <https://doi.org/10.22319/rmcp.v12s3.5876>.
- ENVI. (2012). ENVI Version 5.0; Exelis Visual Information Solutions, Inc.: Boulder, CO, USA.
- Esri. (2013) ArcGIS 10.2 for Desktop. 1999–2013 Esri Inc.; Environmental Systems Research Institute: Redlands, CA, USA.
- Estadística de Producción Ganadera (EPG). (2022) (Consultado en línea): <http://infosiap.siap.gob.mx/gobmx/datosAbiertos.php> (acceso agosto de 2022).
- Fan, F., Weng, Q. y Wang, Y. (2007). Land use and land cover change in Guangzhou, China, from 1998 to 2003, based on Landsat TM/ETM+imagery. *Sensors*, 7, 1323–1342. <https://doi.org/10.3390/s7071323>.
- Fateminick, F., Azizi, K., Ghasemi, S. y Akbarpour, O. (2023). The effect of using of different levels of biological, chemical and manure fertilizers on macro elements and some quantitative traits of forage cactus (*Opuntia ficus-indica* L.). *Plant Productions*, 46(2), 185-198.
- Felker, P., Paterson, A. y Jenderek, M, M. (2006). Forage potential of *Opuntia* clones maintained by the USDA, National Plant Germplasm System (NPGS) collection. *Crop Science* 46:2161–2168.
- Fernández, F. G., & Jardines, A. L. D. (Eds.). (2017). El Altiplano Tamaulipeco: especialización productiva y desarrollo socio-económico. Universidad Autónoma de Tamaulipas.
- Fierro A., A.; González L., M. M.; y Rodríguez A., F. (1999). Producción de nopalito (*Opuntia ficus-indica*) con cuatro dosis de estiércol fresco, en la región de Tulyehalco, D.F. En Memorias del VIII Congreso Nacional y VI Internacional Sobre el Conocimiento y Aprovechamiento del Nopal. 6 al 10 de Septiembre.. Universidad

Autónoma de San Luis Potosí. Compilaron Aguirre R., J. R. y J. A. Reyes A. pp 79-80

Forman, R.T.T. (1994). Land Mosaics, the Ecology of Landscapes and Regions; University Press: Cambridge, MA, USA; pp. 25–632, ISBN 0521 47462 0.

Foroughbakhch, R., Hernández-Piñero, J. L., Carrillo-Parra, A. y Rocha-Estrada, A. (2013). Composition and animal preference for plants used for goat feeding in semiarid northeastern México. *Journal of Animal & Plant Sciences*, 23(4), 1034-1040.

Francès, F., Adam, A. y Castelló, A. (2014) A genetic method for diagnosing *Lantana camara* using a barcoding-based, genus specific, polymerase chain reaction. *Gac. Int. Cienc. Forense*, 1, 11–15.

Fuentes R., J.M., L. Jiménez C., L. Suárez G., M. E. Torres S., M. Murillo M., López, G. J.J. y B. Ortiz R. (2003). Evaluación nutricional de cuatro especies de nopal (*Opuntia* spp) forrajero. Resultados de Proyectos de Investigación 2003. Dirección de Investigación, Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Buenavista, Saltillo, México. 483-488.

Fuls, E.R. (1992). Semi-arid and arid rangelands: A resource under siege due to patch-selective grazing. *J. Arid Environ.*, 22, 191–193. [https://doi.org/10.1016/S0140-1963\(18\)30591-3](https://doi.org/10.1016/S0140-1963(18)30591-3).

Gaffney, R., Augustine, D.J., Kearney, S.P. y Porensky, L.M. (2021). Using Hyperspectral Imagery to Characterize Rangeland Vegetation Composition at Process-Relevant Scales. *Remote Sens.*, 13, 1–17. <https://doi.org/10.3390/rs13224603>.

García, E. (2004). Modificaciones al Sistema de Clasificación Climática de Köppen, Quinta Edición; Instituto de Geografía, UNAM: Distrito Federal, México; pp. 13–90, ISBN 970-32-1010-4.

García-Fernández, F. y Domínguez-Jardines. (2017). El Altiplano Tamaulipeco: Especialización Productiva y Desarrollo Socio-Económico; Universidad Autónoma

de Tamaulipas: Ciudad Victoria, Tamaulipas, México; pp. 73–84, ISBN 978-607-8563-69-2.

Gigord, L.; Picot, F. y Shycoff, J. (1999). Effects of habitat fragmentation on *Dombeya acutangula* (Sterculiaceae), a native tree on La Réunion (Indian Ocean). *Biol. Conserv.*, 88, 43–51. [https://doi.org/10.1016/s0006-3207\(98\)00092-5](https://doi.org/10.1016/s0006-3207(98)00092-5).

Ginane, C., Bonnet, M., Baumont, R. y Revell, D. K. (2015). Feeding behaviour in ruminants: a consequence of interactions between a reward system and the regulation of metabolic homeostasis. *Animal Production Science*, 55(3), 247-260.

Global Land Cover Facility (GLCF) y Global Land Survey (GLS). (2021). Consultado en línea: <http://www.landcover.org/data/gls/> (acceso mayo de 2021).

González, A. B. D. J., García, A. A., Olguín, J. F. L., Rivera, A., y Martínez, V. L. (2016). Entomofauna asociada al nopal verdura (*Opuntia ficusindica* Miller) en San Andrés Cholula, Puebla, México. *Southwestern Entomologist*, 41(1), 259-266.

González, G., Casas, V., Castillo, E. y Ramírez, L. (2021). Evaluación de patrones temporales en la dinámica para el cambio de cobertura vegetal en zonas rurales tropicales durante el periodo 2013-2018. Caso de estudio Chaguaní-Colombia. *Cuad. De Desarro. Rural*. 18, 7. <https://doi.org/10.11144/Javeriana.cdr18.eptd>.

Granados-Sánchez, D., López-Ríos, G.F. y Hernández-García, M.A. (2007). Ecología y silvicultura en bosques templados. *Rev. Chapingo Ser. Cienc. For. Ambiente.*, 13, 67–83.

Guerrero-García, B. y Pereznegron-Pereznegron, R. (2017). Evolución, prospectiva y administración de las zonas áridas de México (CONAZA). *Bibl. Jurídica Del Inst. De Investig. Jurídicas De La UNAM*, 1, 443–472.

Guevara J. C., P. Suassuna, y P. Felker. (2009). *Opuntia* Forage Production Systems: Status and Prospects for Rangeland Application. *Rangeland Ecology & Management*. 428-434.

- Gutiérrez, O. E., Arabel, E., Bernal, H. y Morales, H. (2007). Usos alternativos de nopal forrajero, VI Simposium taller producción y aprovechamiento del nopal en el noroeste de México, 7 y 8 de Diciembre; Marín Nuevo León, México
- Gutman, G., Huang, C., Chander, G.; Noojipady, P. y Masek, J.G. (2013). Assessment of the NASA-USGS Global Land Survey (GLS) datasets. *Remote Sens.*, 134, 249–265. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.02.026>.
- Han, J.G., Zhang, Y.J., Wang, C.J., Bai, W.M., Wang, Y.R., Han, G.D. y Li, L.H. (2008). Rangeland degradation and restoration management in China. *Rangel. J.*, 30, 233–239. <https://doi.org/10.1071/rj08009>.
- Heady, H.F. y Child, R.D. (2019). *Rangeland Ecology and Management*; Routledge: New York, NY, USA; pp. 1–12, ISBN 13:978-0-8133-3799-9.
- Hernández, M.H., Goettsch, B., Gómez-Hinostrosa, C. y Arita, T.H. (2008). Cactus species turnover and diversity along a latitudinal transect in the Chihuahuan Desert Region. *Biodivers. Conserv.*, 17, 703–720. <https://doi.org/10.1007/s10531-007-9303-2>.
- Hernández, U.M.I., Pérez, T.E., y Rodríguez, G.M.E. (2011). Chemical analysis of nutritional content of prickly pads (*Opuntia ficus-indica*) at varied ages in an organic harvest. *International journal of environmental research and public health*. 8(5): 1287-1295
- Hernández-Clemente, R. y Hornero, A. (2021) Monitoreo y evaluación de la desertificación con teledetección. *Ecosistemas*, 30, 2240. <https://doi.org/10.7818/ECOS.2240>.
- Holechek, J.L., Pieper, R.D y Herbel, C.H. (1989) *Range Management Principles and Practices*; Prentice Hall: Hoboken, NJ, USA; pp. 20–76, ISBN-13, 978-0135014165.
- Hunt, R. 2003. Growth analysis, individual plants. En: MURPHY, B.T.; MURRAY, D. (Eds.), *Encyclopedia of Applied Plant Sciences*, 588-596.
- INEGI (2000). Conjunto de Datos Vectoriales de la Serie Topográfica Escala 1:1,000,000; Dirección General de Geografía Instituto Nacional de Estadística y Geografía: Aguascalientes, México.

- INEGI, 1997. Uso Del Suelo y Vegetación, Escala 1:250,000, Serie II (Continuo Nacional); Dirección General de Geografía, Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI): Aguascalientes, México, 1997.
- INEGI. (1974). Uso Del Suelo y Vegetación, Escala 1:250,000, Serie I (Continuo Nacional); Instituto Nacional de Ecología (INE)—Dirección de Ordenamiento Ecológico General e Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI); INEGI: Aguascalientes, México.
- INEGI. (1992). Uso Del Suelo y Vegetación, Escala 1:250,000, Serie II (Continuo Nacional); Dirección General de Geografía, Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI): Aguascalientes, México.
- INEGI. (2001). Uso Del Suelo y Vegetación, Escala 1:250,000, Serie II (Continuo Nacional); Dirección General de Geografía, Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI): Aguascalientes, México.
- INEGI. (2005). Uso Del Suelo y Vegetación, Escala 1:250,000, Serie III (Continuo Nacional); Dirección General de Geografía, Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI): Aguascalientes, México.
- INEGI. (2009). Uso Del Suelo y Vegetación, Escala 1:250,000, Serie III (Continuo Nacional); Dirección General de Geografía, Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI): Aguascalientes, México, 2009.
- INEGI. (2014). Anuario Estadístico y Geográfico por Entidad Federativa; Instituto Nacional de Estadística y Geografía: Ciudad de México, México; pp. 760–762, ISBN 978-607-739-3870.
- INEGI. (2016). Datos Vectoriales de Uso de Suelo y Vegetación. Escala 1:250 000. Serie VI (Capa Unión), Escala: 1:250 000. Edición: 1; Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI): Aguascalientes, México.
- INEGI. (2017). Anuario Estadístico y Geográfico de Tamaulipas; Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI): Aguascalientes City, México; pp. 1–60.

- INEGI. (2017). Uso Del Suelo y Vegetación, Escala 1:250,000, Serie IV (Continuo Nacional); Dirección General de Geografía, Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI): Aguascalientes, México, 2017.
- INEGI. (2018). Uso Del Suelo y Vegetación, Escala 1:250,000, Serie IV (Continuo Nacional); Dirección General de Geografía, Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI): Aguascalientes, México.
- INEGI. (2022). Censo de Población y Vivienda 2020. 18 de Marzo de. 2021. Consultado en línea: <https://www.inegi.org.mx/programas/ccpv/2020/> (acceso agosto de 2022).
- INEGI-CONAGUA. (2007). Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI): Continuo Nacional del Conjunto de Datos Geográficos de la carta Hidrológica de aguas superficiales Escala 1:250 00, serie 1. CONAGUA. Organismo de Cuenca Golfo Norte: Dirección de infraestructura hidroagrícola Cuencas Hidrológicas: Ciudad de México, México.
- Inglese, P. (2018). Ecología del cultivo, manejo y usos del nopal. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura-Centro Internacional de Investigaciones Agrícolas en Zonas Áridas. Roma. 245 Pp.
- Inglese, P. 1995, Orchard planting management. In G. Barbera, P. Inglese & E. Pimienta Barrios, eds. Agro-ecology cultivation and uses of cactus pear, pp. 78–91. Plant Production and Protection Paper No. 132. Rome, FAO.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2022) Encuesta Nacional Agropecuaria, 28 de noviembre de. 2014. En línea en: <https://www.inegi.org.mx/programas/ena/2014/>.
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). (2004). Guía Para La Interpretación de Cartografía: Edafología; Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática: Aguascalientes, México; pp. 1–27, ISBN 970-13-4376-X.
- Jacques-Hernández, C. (2009). Caracterización y usos de las especies de agave en Tamaulipas. El Reino Veg. Farmacol. Y Ter., 89, 91–100.

- Johnston, P. W., Tannock, P. R. y Beale, I. F. (1996). ObjectiveSafe'Grazing Capacities for South-West Queensland Australia: Model Application and Evaluation. *The Rangeland Journal*, 18(2), 259-269.
- Junior, J. D., Silva, N. G. M., Santos, M. V. F., Cunha, M. V., Santos, D. C., Lira, M. A., Mello, A.C.L. y Pinto, M. S. C. (2013). Organic fertilization and plant population affect shoot and root biomass of forage cactus pear (*Opuntia ficus-indica* Mill.). *Acta Hortic.*, 995, 221-224.
- Kaufmann, I., Feldman, S.R. y Sacido, M.B. (2019). Efectos del pastoreo en riqueza florística, biomasa y cobertura de un pastizal de albardón, Argentina. *Rev. Politécnica*, 29, 95–107. <https://doi.org/10.33571/rpolitec.v15n29a8>.
- Keenleyside, K.A., Dudley, N., Cairns, S., Hall, C.M. y Stolton, S. (2014). Restauración Ecológica Para Áreas Protegidas: Principios, Directrices y Buenas Practices; UICN-CMAP: Gland, Switzerland; pp. 71–99, ISBN 978-2-8317-1678-7.
- Körner, C. (2015). Paradigm shift in plant growth control. *Current Opinion in Plant Biology* 25,107-114.
- Lara-Requena, G.N., Cámara-Artigas, R. y Casas-González, S. (2010). Análisis de los cambios de uso de suelo en la cuenca Guayalejo-Tamesí (Tamaulipas, México) en tres décadas de información digital. *Mapping*, 143, 86–94.
- Lara-Villalón, M., Solís, M. A., Sánchez-Ramos, G., y Mora-Olivo, A. (2016). The Cactus Webworm, *Loxomorpha flavidissimalis* (Grote, 1878) (Pyraloidea, Crambidae): Its Distribution and Potential as a Pest of Cultivated Cactus (*Opuntia ficus-indica* (L.) Mill., Var. COPENA V-1) (Cactaceae) in Tamaulipas, Mexico. *Proceedings of the Entomological Society of Washington*, 118(1), 109-114.
- Lausch, A. y Hertzog, F. (2002). Applicability of landscape metrics for the monitoring of landscape change: Issues of scale, resolution and interpretability. *Ecol. Indic.*, 2, 3–15. [https://doi.org/10.1016/s1470-160x\(02\)00053-5](https://doi.org/10.1016/s1470-160x(02)00053-5).

- López G., J.J., R. Fuentes, J. M. y A. Rodríguez G., A. 2003. Producción y uso de *Opuntia* como forraje en el centro-norte de México. En Mondragón-Jacobo, L. y S. Pérez-González. (Eds.). El Nopal (*Opuntia* spp.) Como Forraje. Estudio FAO Producción y Protección Vegetal 169. FAO, Roma, Italia.
- López-Rodríguez, P. E., de Jesús Méndez-Gallegos, S., Aquino-Pérez, G., Mena-Covarrubias, J. y Vanegas-Rico, J. M. (2018). Estadísticos demográficos de *Dactylopius opuntiae* Cockerell (Hemiptera: Dactylopiidae) en condiciones de invernadero. Revista Chapingo Serie Zonas Áridas, 17(2), 31-42.
- Lozano, L. (2011). Ecofisiología de la tuna (*Opuntia ficus-indica* (L.) Mill.). Horticultura Argentina, 30(72), 37-52.
- Luna Vázquez, J., Zegbe Domínguez, J. A., Mena Covarrubias, J. y Rivera Lozano, M. T. (2012). Manejo de plantaciones de nopal tunero en el altiplano Potosino. Folleto para Productores No. MX-0-310305-32-03-17-10-59. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias Centro de Investigación Regional del Noreste Campo Experimental San Luis. 23 p.
- Luna-Vázquez, J. y Urrutia-Morales, J. (2008). Nopal para forraje en el Altiplano Potosí. INIFAP-CIRNE-Campo Experimental San LUIS. Folleto para productores No. 49 San Luis Potosí, S.L.P, México. 31 p.
- Lund, H.G. (2007). Accounting for the world's rangelands. Rangelands 29: 3–10.
- Maduro-Dias, C., Barcelos-Nunes, H. P., Vouzela, C., Madruga, J. y Borba, A. (2022) Seasonal Variations of the Nutritive Value and Gas Production Of *Opuntia Ficus-Indica* And *Agave Americana* L. For Ruminant's Nutrition 1, 1-16.
- Maestre, F.T., Cortina, J., Bautista, S., Bellot, J. y Vallejo, R. (2003). Small-scale environmental heterogeneity and spatiotemporal dynamics of seedling establishment in a semiarid degraded ecosystem. Ecosystems, 6, 630–643. <https://doi.org/10.1007/s10021-002-0222-5>.

- Malhi, G.S., Kaur, M. y Kaushik, P. (2021). Impact of Climate Change on Agriculture, and Its Mitigation Strategies: A Review. *Sustainability Sustainability*, 13, 1318. <https://doi.org/10.3390/su13031318>.
- Martínez, L. J. R., Vásquez-Alvarado, R. E., Gutiérrez-Órtales, E., Olivares-Sáenz, E., Vidales-Contreras, J. A., Valdez-Cepeda, R. D., Peña, M. A. y López-Cervantes, R. (2009). Calidad nutricional y rendimiento de nopal forrajero abonados orgánicamente, XXX Ciclo de Seminarios de Posgrado e Investigación, 25 y 26 de junio, Escobedo Nuevo León, México, p. 69-74.
- Martínez-Rojas, A. y Torres-Torres, F. (2018). Suelo Agrícola En México: Retrospección y Prospectiva para La Seguridad Alimentaria. Realidad, Datos y Espacio. *Rev. Intern. Estadística Geogr*, 9, 137–155.
- McCalla, G.R., Blackburn, W.H. y Merrill, L.B. (1984). Effects of livestock grazing on sediment production, Edwards Plateau of Texas. *J. Range Manag.*, 37, 291–294. <https://doi.org/10.2307/3898696>.
- McDonald, S.E., Reid, N., Smith, R., Waters, C.M., Hunter, J., Rader, R. (2019). Rotational grazing management achieves similar plant diversity outcomes to areas managed for conservation in a semi-arid rangeland. *Rangel. J.*, 41, 135–145. <https://doi.org/10.1071/RJ18090>.
- McIntosh, M. M., Holechek, J. L., Spiegel, S. A., Cibils, A. F. y Estell, R. E. (2019). Long-term declining trends in Chihuahuan Desert forage production in relation to precipitation and ambient temperature. *Rangeland ecology & management*, 72(6), 976-987.
- McIntyre, N.E. (1995). Effects of forest patch size on avian diversity. *Landsc. Ecol.*, 10, 85–99. <https://doi.org/10.1007/bf00153826>.
- Mendez Gallegos, S. J. y Martinez Hernandez, J. (1988). Efecto de la fertilizacion quimica y organica en tres formas de nopal (*Opuntia spp*), sobre el rendimiento, en una plantacion comercial de ojocaliente, Zacatecas. En *Memorias Reunión Nacional e International Sobre Conocimiento y Aprovechamiento del Nopal*, 127-144.

- Millennium Ecosystem Assessment (MA). (2005). Current state and trends, 917. Washington, DC: Island Press.
- Miranda, F. (, 1955). Formas de Vida Vegetales y el Problema de la Delimitación de las Zonas Áridas de México; Instituto Mexicano de Recursos Naturales Renovables: Ciudad de México, México; pp. 105–143.
- Mitchell, J.E. (2000). Rangeland resource trends in the United States: A technical document supporting the 2000 USDA Forest Service RPA Assessment. General Technical Report RMRS-GTR-68, 68; US Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station: Fort Collins, CO, USA; pp. 11–24.
- Molina-Guerra, V.M., Mora-Olivo, A., Alanís-Rodríguez, E., Soto-Mata, B. y Patiño-Flores, A.M. (2019). Plantas Características del Matorral Espinoso Tamaulipeco en México; Universidad Autónoma de Nuevo León: Monterrey, México; pp. 1–30, ISBN: 978-607-27-1168-6.
- Montaña, C. (1992). The colonization of bare areas in two-phase mosaics of an arid ecosystem. *J. Ecol.*, 80, 315–327. <https://doi.org/10.2307/2261014>.
- Murillo A., B.; E. Troyo D.; H. A. Cortés A. (1999). Efecto de la salinidad en la producción de nopalito (*Opuntia ficus-indica* Mill. (L.)). En Memorias del VIII Congreso Nacional y VI Internacional Sobre el Conocimiento y Aprovechamiento del Nopal. 6 al 10 de Septiembre.. Universidad Autónoma de San Luis Potosí. Compilaron Aguirre R., J. R. y J. A. Reyes A. pp 85-86
- Murillo-Amador Bernardo, José Luis García-Hernández, Narciso Ysac Ávila-Serrano, Ignacio Orona-Castillo, Enrique Troyo-Diéguez, Alejandra Nieto-Garibay, Francisco H. Ruiz-Espinoza, Sergio Zamora-Salgado, 2005. A multivariate approach to determine the effect of doses and sources of N, P, and K in *Opuntia ficus-indica* L. Mill. *Journal of the Professional Association for Cactus Development* 7: 110-124.
- Nair, R.P.K. (1997). Agroforestería; Universidad Autónoma Chapingo: Chapingo, Estado de México, México; p. 543.

- Najera- Castro, A. (2010). Protección de plántulas forestales contra el ataque de lagomorfos y roedores. Comision Nacional Forestal, 29 Pp.
- Neder, D. G., Costa, F. R. D., Edvan, R. L. y Souto Filho, L. T. (2013). Correlations and path analysis of morphological and yield traits of cactus pear accessions. *Crop Breeding and Applied Biotechnology*, 13, 203-207.
- Nefzaoui, A. y M. El Mourid. (2007). Cash from cactus. *ICARDA Caravan* 24: 7–9.
- Negrete-Sánchez, L.O., Aguirre-Rivera, J.R., Pinos-Rodríguez, J.M. y Reyes Hernández, H (2016). Benefits of the parcellation of communal rangelands of the ejido El Castañón, Municipality Fourteen, San Luis Potosí, México: 1993-2013. *Agrociencia*, 50, 511–532.
- Nellemann, C. (2001). GLOBIO-Global Methodology for Mapping Human Impacts on the Biosphere; UNEP: Nairobi, Kenia; pp. 13–24, ISBN 92-807-2051-1.
- Neupane, D., Mayer, J. A., Niechayev, N. A., Bishop, C. D. y Cushman, J. C. (2021). Five-year field trial of the biomass productivity and water input response of cactus pear (*Opuntia* spp.) as a bioenergy feedstock for arid lands. *GCB Bioenergy*, 13(4), 719-741.
- Niamir-Fuller, M. (1999). Managing Mobility in African Rangelands; Intermediate Technology Publications: London, UK; pp. 18–46, ISBN 10: 1 85339 4734.
- Odadi, W.O., Fargione, J. y Rubenstein, D.I. (2017). Vegetation, wildlife, and livestock responses to planned grazing management in an African pastoral landscape. *Land Degrad. Dev.*, 28, 2030–2038. <https://doi.org/10.1002/ldr.2725>.
- Oussedik, A., Iftene, T. y Zegrar, A. (2003). Réalisation par télédétection de la carte d’Algérie de sensibilité à la désertification. *Sécheresse*, 14, 195–201.
- Pandey, R., Paul, V., Das, M., Meena, M., y Meena, R. C. (2017). Plant growth analysis. Manual of ICAR Sponsored Training Programme on “Physiological Techniques to Analyze the Impact of Climate Change on Crop Plants, 103-107.

- Paruelo, J. M. (2008). La caracterización funcional de ecosistemas mediante sensores remotos. *Ecosistemas*, 17(3):4-22.
- Pérez-Sánchez, R. E., Delgado-Sánchez, L. A., García-Saucedo, P. A., Pulido, J. y Ortiz-Rodríguez, R. (2015). Caracterización, modelación morfológica y análisis proximales de *Opuntia ficus-indica* y *O. atropes* durante las épocas de estiaje y lluvias. *Nova scientia*, 7(15), 133-152.
- Pérez-Serna, A. y Echavarría-Cháirez, F.G. (2002). Caracterización hidrológica de un agostadero comunal excluido al pastoreo en Zacatecas, México. I. Pérdidas de suelo. *Rev. Mex. Cienc. Pecu.*, 40, 37–53.
- Pettorelli, N., Ryan, S., Mueller, T., Bunnefeld, N., Jedrzejewska, B., Lima, M. y Kausrud, K. (2011). The Normalized Difference Vegetation Index (NDVI): unforeseen successes in animal
- Pickup, G., Chewings, V.H. y Nelson, D.J. (1993). Estimating changes in vegetation cover over time in arid rangelands using landsat MSS data. *Remote Sens. Environ.*, 43, 243–263. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(93\)90069-a](https://doi.org/10.1016/0034-4257(93)90069-a).
- Piessens, K., Honnay, O. y Hermy, M. (2005). The role of fragment area and isolation in the conservation of heathland species. *Biol. Conserv.*, 122, 61–69. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2004.05.023>.
- Pimienta-Barrios, E., Castillo-Cruz, I., Zañudo-Hernández, J., Méndez-Morán, L. y Nobel, P. S. (2007). Effects of shade, drought and daughter cladodes on the CO₂ uptake by cladodes of *Opuntia ficus-indica*. *Annals of applied biology*, 151(2), 137-144.
- Pinos-Rodríguez, J.M., Gómez-Ruiz, W.J., Aguirre-Rivera, J.R., García-López, J.C. y Álvarez-Fuentes, G. (2015). Profitability of goat production in the Mexico highlands. *Outlook Agric.*, 44, 223–233. <https://doi.org/10.5367/oa.2015.0214>.
- Poorter, H., Lambers, H. y Evans, J.R. (2014). Trait correlation networks: a whole-plant perspective on the recently criticized leaf economic spectrum. *New Phytologist* 201 (2), 378-382.

- Pozo-Díaz, M. Z. y Carrasco, G. I. (2005). Aplicación del análisis discriminante a un conjunto de datos vinícolas mediante el paquete estadístico SPSS v10. *Tecnociencia*, 7(1), 7-21.
- Ramírez-Cervantes, M.C. (2005). Plantas de importancia económica en zonas áridas y semiáridas de México. In *Proceedings of the Anais do X Encontro de Geógrafos de América Latina*, Universidad de São Paulo, São Paulo, Brazil, 20–26 March; pp. 3388–3407.
- Rana, M. S. P. y Moniruzzaman, M. (2023). Potential application of GIS and remote sensing to evaluate suitable site for livestock production in Northwestern part of Bangladesh. *Watershed Ecology and the Environment*, 5, 161-172.
- Regasa, M. S., Nones, M. y Adeba, D. (2021). A review on land use and land cover change in Ethiopian basins. *Land*, 10(6), 585.
- Reid, R.S., Fernández-Giménez, M.E. y Galvin, K.A. (2014). Dynamics and Resilience of Rangelands and Pastoral Peoples around the Globe. *Annu. Rev. Environ. Resour*, 39, 217–242. <https://doi.org/10.1146/annurev-environ-020713-163329>.
- Reis, C. M. G., Gazarini, L. C., Fonseca, T. F. y Ribeiro, M. M. (2018). Above-ground biomass estimation of *Opuntia ficus-indica* (L.) Mill. for forage crop in a Mediterranean environment by using non-destructive methods. *Experimental Agriculture*, 54(2), 227-242.
- Reveles, H. M., Flores-Ortiz, M. A., Blanco-Macías, F., Valdez-Cepeda, R. D. y Félix-Reyes, G. (2010). El manejo del nopal forrajero en la producción de ganado bovino, *RESPYN*, Edición Especial No. 5, p. 130-144.
- Reyes-Agüero J. Antonio, Aguirre-Rivera J. Rogelio y Hernández Héctor M. (2005). SYSTEMATIC NOTES AND A DETAILED DESCRIPTION OF *Opuntia ficus-indica* (L.) MILL. (CACTACEAE). *Agrociencia* 39: 395-408.

- Riginos, C. y Hoffman, M.T. (2003). Changes in Population Biology of Two Succulent Shrubs along a Grazing Gradient. *J. Appl. Ecol.*, 40, 615–625. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2664.2003.00826.x>.
- Ríos R. J. y V. Quintana M. (2004). Manejo general del cultivo del nopal. Colegio de Postgraduados, Secretaría de la Reforma Agraria. Manual del participante. México. 81 p.
- Rivera Martínez, J. G., Puebla, H., Méndez, F., Martínez, J., Herrera, J. y Licea, G. (2015). Cultivo intensivo tradicional de nopal verdura (*Opuntia ficus-indica* L.) en ámbitos urbanos delegación Milpa Alta al oriente de la ciudad de México. In V Congreso Latinoamericano de Agroecología-SOCLA (7 al 9 de octubre de 2015, La Plata)..
- Rodrigo-Comino, J., Salvia, R., Egidi, G., Salvati, L., Giménez-Morera, A. y Quaranta, G. (2022). Desertification and Degradation Risks vs Poverty: A Key Topic in Mediterranean Europe. *Geogr. Res. Lett.*, 48, 23–40. <https://doi.org/10.18172/cig.4850>.
- Rodrigues, A. M., Pitacas, F. I., Reis, C. M. G., y Blasco, M. (2016). Nutritional value of *Opuntia ficus-indica* cladodes from Portuguese ecotypes. *Bulgarian Journal of Agricultural Science*, 22(1), 40-45.
- Rosete-Vergés, F.A., Pérez-Damián, J.L., Villalobos-Delgado, M., Navarro-Salas, E.N., Salinas-Chávez, E. y Remond-Noa, R. (2014). El avance de la deforestación en México 1976–2007. *Madera Y Bosques*, 20, 21–35. <https://doi.org/10.21829/myb.2014.201173>.
- Rzedowski, J. (2006). Vegetación de México 1ra. Capítulo 4. Influencia del Hombre. Edición Digital; Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad: Ciudad de México, México; pp. 59–74.
- Rzedowski, J. (1990). Vegetación potencial. IV.8.2. Atlas Nacional de México. Volumen 2. Escala 1: 4,000,000; Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México: México, D.F., México.

- Salamani, M., Kadi Hanafi, H., Hirche, A. y Nedjraoui, D. (2013). Évaluation de la sensibilité à la désertification en Algérie. *Rev. Ecol.*, 68, 71–84.
- Salazar-Sosa, E., Trejo-Escareño, H. I., González-Villa, D. C., Fortis-Hernández, M., Orón-Castillo, I. y Vázquez-Vázquez, C. (2010). Producción orgánica de nopal forrajero (*Opuntia ficus indica*) variedad liso forrajera, IX Symposium-Taller Nacional y II Internacional “Producción y Aprovechamiento del Nopal y Maguey”, Campus de Ciencia Agropecuarias de Nuevo León, UANL. Escobedo Nuevo León, México 12 y 13 de Noviembre, p. 95-109.
- Salazar-Sosa, E., Trejo-Escareño, H. I., Lopez-Martinez, J. D., Betancourt, M. D. L. G., Garcia, A. A. V. y Galicia, J. A. C. (2017). *Opuntia* Forage (*Opuntia Ficus-Indica* L), Response to Solarized Cattle Manure Amendments in Four Plant Densities. *International Journal of New Technology and Research*, 3(9), 263246.
- Salazar-Sosa, E., Trejo-Escareño, H. I., Vázquez-Vázquez, C. y López-Martínez, J. D. (2007). Producción de maíz bajo riego por cintilla, con aplicación de estiércol bovino. *Phyton Rev. Int. Bot. Exp.* 76: 169-185.
- Sánchez, J. y Ramírez-Valverde, B. (2007). El turismo rural como complemento al desarrollo territorial rural en zonas indígenas de México. *Scripta Nova. Rev. Elect. Geogr. Cienc. Soc.*, 11, 1–16.
- Sánchez-Reyes, U.J., Niño-Maldonado, S., Barrientos-Lozano, L. y Treviño-Carreón, J. (2017). Assessment of Land Use-Cover Changes and Successional Stages of Vegetation in the Natural Protected Area Altas Cumbres, Northeast Mexico, Using Landsat Satellite Image. *Remote Sens.*, 9, 712. <https://doi.org/10.3390/rs9070712>.
- Santos, D. D., Farias, I., LIRA, M. D. A., Fernandes, A. P. M., Freitas, E. V. y Moreno, J. (1996). Produção e composição química da palma forrageira cv. Gigante (*Opuntia ficus-indica* Mill) sob adubação e calagem, no Agreste Semiárido de Pernambuco. *Pesquisa Agropecuária Pernambucana*, Recife, 9, 69-78.
- Santos, M.V.F. dos, Lira, M. de A., Farias, I., Burity, H.A., Nascimento, M.M.A. y Tavares-Filho, J.J. (1990). Estudo comparativo das cultivares de palma forrageira “Gigante”,

“Redonda” (*Opuntia ficus-indica*, Mill) e “Miúda” (*Nopalea cochenillifera*, Salm Dyck) na produção de leite. Rev. Soc. Bras. Zootec., 19(6): 504–511.

Sayre, N.F., McAllister, R.R., Bestelmeyer, B.T., Moritz, M. y Turner, M.D. (2013). Earth Stewardship of Rangelands: Coping with Ecological, Economic, and Political Marginality. Front. Ecol. Environ., 11, 348–354. <https://doi.org/10.1890/120333>.

Scalisi, A., Morandi, B., Inglese, P. y Bianco, R. L. (2016). Cladode growth dynamics in *Opuntia ficus-indica* under drought. Environmental and Experimental Botany, 122, 158-167.

Schwilch, G., Hessel, R. y Verzaandvoort, S. (2012). Desire for greener land: options for sustainable land management in drylands. CTA/Alterra. 282 Pp.

Scoones, I. (1993). Living with Uncertainty: New Directions for Pastoral Development in Africa; Intermediate Technology Publications: London, UK; pp. 1–32, ISBN 978 1 85339 2351.

Secretaría de Agricultura, ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA). 2015. Estudio de factibilidad para el Establecimiento de cultivo de nopal (*Opuntia*) en tierras ociosas en los estados de Aguascalientes, San Luis Potosí, Guanajuato y Zacatecas con fines alimenticios, energéticos y ambientales. Componente Planeación de Proyectos. Folio: 211PP062. México. 91 p.

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales/Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (2012). Programa de Acción Para la Conservación de la Especie: Guacamaya Verde (*Ara Militar*), Oropeza-Hernández, P.; Rendón-Hernández, E. Eds.; Ciudad de Mexico, México; pp. 1–28.

SEMARNAP y CONAMP. (2018). Plan de Acción Para la Conservación de la Mariposa Monarca en México, 2018–2024; Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales y Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas: Ciudad de México, México; pp. 38–43.

- Sepúlveda-Varas, A., Saavedra-Briones, P. y Esse, C. (2019). Análisis de cambio de cobertura y uso de suelo en una subcuenca preandina chilena. Herramienta para la sustentabilidad productiva de un territorio. *Rev. De Geogr. Norte Gd.*, 72, 9–25. <https://doi.org/10.4067/S0718-34022019000100009>.
- SIAP. (2022). Población Ganadera-Información Sobre el Número de Animales Que se Crían en el País Con Fines de Producción, 22 de Julio de. 2022. Consultado en línea <https://www.gob.mx/siap/documentos/poblacion-ganadera-136762> (acceso agosto de 2022).
- Silcock, J.L. y Fensham, R.J. (2013). Arid vegetation in disequilibrium with livestock grazing evidence from long-term exclosures. *Austral Ecol.*, 38, 57–65. <https://doi.org/10.1111/j.1442-9993.2012.02374.x>.
- Siller-Clavel, P., Badano, E.I., Villarreal-Guerrero, F., Prieto-Amparán, J.A., Pinedo-Álvarez, A., Corrales-Lerma, R., Álvarez-Holguín, A. y Hernández-Quiroz, N.S. (2022). Distribution Patterns of Invasive Buffelgrass (*Cenchrus ciliaris*) in Mexico Estimated with Climate Niche Models under the Current and Future Climate. *Plants*, 1, 1160. <https://doi.org/10.3390/plants11091160>.
- Silva, N. G. D. M. (2012). Produtividade, morfometria e acúmulo de nutrientes da palma forrageira sob doses de adubação orgânica e densidades de plantio. Recife, Brazil, Animal Science, Federal Rural University of Pernambuco (PhD dissertation). 97 Pp.
- Siqueira, J.O., Carbone, C.M.A., Curi, N., Rosado, S.C. y Davide, A.C. (1998). Mycorrhizal colonization and mycotrophic growth of native woody species as related to successional groups in Southeastern Brazil. *For. Ecol. Manag.*, 107, 241–252. [https://doi.org/10.1016/s0378-1127\(97\)00336-8](https://doi.org/10.1016/s0378-1127(97)00336-8).
- Skole, D. y Tucker, C. (1993). Tropical deforestation and habitat fragmentation in the Amazon: Satellite data from 1978 to 1988. *Science*, 260, 1905–1910. <https://doi.org/10.1126/science.260.5116.1905>.
- SNIARN (Sistema Nacional de Información Ambiental y de Recursos Naturales). (2005). Informe de la situación del medio ambiente en México. Compendio de Estadísticas

Ambientales; Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales: México, D. F., Mexico; pp. 39–59, ISBN en trámite.

Soffianian, A. y Madanian, M. (2015). Monitoring land cover changes in Isfahan Province, Iran using Landsat satellite data. *Environ. Monit. Assess.*, 187, 543. <https://doi.org/10.1007/s10661-015-4442-5>.

Squires, V.R. (2010). People in rangelands: Their role and influence on rangeland utilization and sustainable management. In *Range and Animal Sciences and Resources Management*; Squires, V.R., Ed; University of Adelaide: Adelaide, Australia; pp. 2–19, ISBN 978-1-84826-370-3.

StatSoft Inc. (2007). STATISTICA (Data Analysis Software System), version 8.0. Retrieved from <http://www.statsoft.com>.

Teague, R., Grant, B. y Wang, H.H. (2015). Assessing optimal configurations of multi paddock grazing strategies in tallgrass prairie using a simulation model. *J. Environ. Manag.*, 150, 262–273. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2014.09.027>.

Teague, R., Provenza, F., Kreuter, U., Steffens, T. y Barnes, M. (2013). Multi-paddock grazing on rangelands: Why the perceptual dichotomy between research results and rancher experience? *J. Environ. Manag.*, 128, 699–717. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2013.05.064>.

Thurow, T. L. y Taylor, C. A. (1999). The role of drought in range management. *Journal of Range Management* 52(5), 413-419.

Tomimatsu, H. y Ohara, M. (2003). Genetic diversity and local population structure of fragmented populations of *Trillium camschatcense* (Trilliaceae). *Biol. Conserv.*, 109, 249–258. [https://doi.org/10.1016/S0006-3207\(02\)00153-2](https://doi.org/10.1016/S0006-3207(02)00153-2).

Torres-Acosta, J. F. de J., Alonso-Díaz, M. Á., Hoste, H., Sandoval-Castro, C. A. y Aguilar-Caballero, A. J. (2008). Efectos negativos y positivos del consumo de forrajes ricos en taninos en la producción de caprinos. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*. 9(1): 83-90.

- Torres-Ponce, R.L., Morales-Corral, D., Ballinas-Casarrubias, M.D.L. y Nevárez-Moorillón, G.V. (2015). El nopal: planta del semidesierto con aplicaciones en farmacia, alimentos y nutrición animal. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 6: 1129-1142.
- Toth, J. D., Dou, Z., Ferguson, J. D., Galligan, D. T., y Ramberg Jr, C. F. (2006). Nitrogen- vs. phosphorus-based dairy manure applications to field crops: Nitrate and phosphorus leaching and soil phosphorus accumulation. *Journal of environmental quality*, 35(6), 2302-2312.
- Treviño-Carreón, J. y Valiente-Banuet, A. (2005). La vegetación de Tamaulipas y sus principales asociaciones vegetales. In *Biodiversidad Tamaulipeca*; Barrientos-Lozano, L., Correa-Sandoval, A., Horta-Vega, J.V., García-Jiménez, J., Eds.; Dirección General de Educación Superior Tecnológica, Instituto Tecnológico de Ciudad Victoria: Ciudad Victoria, México; Volume 1, pp. 22–46, ISBN 968-5823-19-7.
- Turner, I.M. (1996). Species loss in fragments of tropical rain forest: A review of the evidence. *J. Appl. Ecol.*, 33, 200–209. <https://doi.org/10.2307/2404743>.
- Turner, M. y Gardner, R. (2015). *Landscape ecology in theory and practice. Patterns and Process*; Springer: New York, NY, USA; pp. 287–332, ISBN 978-1-4939-2793-7.
- Ulziibaatar, M. y Matsui, K. (2021). Herders' Perceptions about Rangeland Degradation and Herd Management: A Case among Traditional and Non-Traditional Herders in Khentii Province of Mongolia. *Sustainability*, 13, 7896. <https://doi.org/10.3390/su13147896>.
- Ünal, S., Mutlu, Z., Urla, O., Hakan, Y. y Şahin, B. (2013). Evaluation and Determination of Rangeland Vegetation in Kayseri Province. *Tarla Bitk. Merk. Araşt. Enst. Derg.*, 22, 86–95.
- USGS Global Visualization Viewer (GLOVIS). (2021). United States Geological Survey Earth Resources Observation Systems. 2021. Consultado en línea: <http://glovis.usgs.gov/> (acceso mayo de 2021).

- USGS. (2020). Landsat 8 (L8) Data Users Handbook Version 2.0. EROS, Sioux Falls, South Dakota. Consultado en línea: <https://landsat.usgs.gov/landsat-8-l8-data-users-handbook> (acceso mayo de 2021).
- Valdez C., R. D., F. Blanco M., C. Gallegos V., G. E. Salinas G., R.E. y Vázquez A. (2001). Freezing tolerance of *Opuntia* spp. J.PACD. 111-115.
- Vázquez A., R. E. (2006). Aspectos importantes de la siembra y fertilización en nopal verdura. Taller práctico. Facultad de Agronomía, Universidad Autónoma de Nuevo León. Marín, N. L., México.
- Vázquez-Vázquez, C., Zúñiga-Tarango, R., Orona-Castillo, I., Murillo-Amador, B., Salazar-Sosa, E., Vázquez-Alvarado, R. y de Santa Rita, C. P. P. (2007). Análisis del Crecimiento Radical en Cuatro Variedades de Nopal (*Opuntia ficus-indica* (L.) Mill). J. PACD (1) 82-90.
- Ventura-Ríos, A., Plascencia-Escalante, F.O., Hernández-de la Rosa, P., Ángeles-Pérez, G. y Aldrete, A. (2017) ¿Es la reforestación una estrategia para la rehabilitación de bosques de pino?: Una experiencia en el centro de México. Bosque (Valdivia), 38, 55–66. <https://doi.org/10.4067/S0717-92002017000100007>.
- Villarruel-Sahagún, L., Troyo-Diéguez, E., Gutiérrez-Ruacho, O. G., Nieto-Garibay, A., Esqueda, M., Ffolliot, P. y Solís-Garza, G. (2014). Valoración hidro-ambiental y evaluación de coeficientes de agostadero mediante indicadores termopluiométricos. Revista mexicana de ciencias pecuarias, 5(2), 143-156.
- Wondrade, N., Dick, Ø.B. y Tveite, H. (2014). Gis based mapping of land cover changes utilizing multi-temporal remotely sensed image data in Lake Hawassa Watershed, Ethiopia. Environ. Monit. Assess. 186, 1765–1780. <https://doi.org/10.1007/s10661-013-3491-x>.
- Worqlul, A. W., Dile, Y. T., Bezabih, M., Adie, A., Srinivasan, R., Lefore, N. y Clarke, N. (2022). Identification of suitable areas for fodder production in Ethiopia. Catena, 213, 106154.

- Zapata-Campos, C. C. y Mellado-Bosque, M. Á. (2021). La cabra: selección y hábitos de consumo de plantas nativas en agostadero árido. *CienciaUAT*, 15(2), 169-185.
- Zerga, B. (2015). Rangeland Degradation and Restoration: A Global Perspective. *Point J. Agric. Biotechnol. Res.*, 1, 37–54
- Zermeño-Hernández, I., Méndez-Toribio, M., Siebe, C., Benítez-Malvido, J. y Martínez-Ramos, M. (2015). Ecological disturbance regimes caused by agricultural land uses and their effects on tropical forest regeneration. *Appl. Veg. Sci.*, 18, 443–455. <https://doi.org/10.1111/avsc.12161>.

10. ANEXOS

10.2 Artículo publicado; Patterns of Change and Successional Transition in a 47-Year Period (1973–2020) in Rangelands of the Tamaulipan Highlands, Northeastern Mexico

doi: <https://doi.org/10.3390/f14040815>



forests



Article

Patterns of Change and Successional Transition in a 47-Year Period (1973–2020) in Rangelands of the Tamaulipan Highlands, Northeastern Mexico

Lucas Hernández-Hernández, Pedro Almaguer-Sierra, Ludivina Barrientos-Lozano *, Uriel Jeshua Sánchez-Reyes, Aurora Y. Rocha-Sánchez and Juan Flores-Gracia

Tecnológico Nacional de México-Instituto Tecnológico de Ciudad Victoria-División de Estudios de Posgrado e Investigación, Boulevard Emilio Portes Gil No. 1301, C.P. 87010 Ciudad Victoria, Tamaulipas, Mexico; g20380018@cdvictoria.tecnm.mx (L.H.-H.); pedro.a@cdvictoria.tecnm.mx (P.A.-S.); uriel.s@cdvictoria.tecnm.mx (U.J.S.-R.); aurora.r@cdvictoria.tecnm.mx (A.Y.R.-S.); juan.fg@cdvictoria.tecnm.mx (J.F.-G.)

* Correspondence: ludivina.b@cdvictoria.tecnm.mx



Citation: Hernández-Hernández, L.; Almaguer-Sierra, P.; Barrientos-Lozano, L.; Sánchez-Reyes, U.J.; Rocha-Sánchez, A.Y.; Flores-Gracia, J. Patterns of Change and Successional Transition in a 47-Year Period (1973–2020) in Rangelands of the Tamaulipan Highlands, Northeastern Mexico. *Forests* **2023**, *14*, 815. <https://doi.org/10.3390/f14040815>

Academic Editors: Dominick A. DellaSala, Lin Qi and Wangming Zhou

Received: 23 March 2023

Revised: 10 April 2023

Accepted: 12 April 2023

Published: 15 April 2023



Copyright: © 2023 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

Abstract: Rangelands in arid and semi-arid regions are the main source of livestock feed. The fragmentation of these ecosystems by continuous grazing gives rise to the modification of ecological processes, which alters the structure and functionality of plant communities. Therefore, the use of geographic information systems and the analysis of satellite images are important to monitor spatial changes and to evaluate these areas in the Tamaulipan Highlands of northeastern Mexico. This work aimed to evaluate the current state of the rangelands and to determine the percentage of modified areas as well as propose the time of permanence, succession, or recovery of five different areas destined for rangelands. For the analysis, Landsat satellite scenes from the period 1973–2020 were used: they were classified into four categories using segmentation and maximum likelihood analysis, as well as a cross-tabulation method to determine the degree of succession. An increase in rangelands was found in three of the five areas analyzed in the period from 1973 to 2020. As rangeland areas increase, the coverage of pine-oak forests, submontane-thorny scrub, and anthropogenic areas, decreases. The disturbance processes were not linear, and the increase in rangeland areas was greater in xerophilous scrub and secondary vegetation. This work is the first contribution that evaluates the changes in land use and cover in grazing areas compromised by continuous grazing in the Tamaulipan Highlands and Mexico. In addition, the results indicate the importance of performing studies based on the coexistence of wildlife and livestock as well as the interaction between soil degradation and plant diversity with the increase in rangelands.

Keywords: rangeland; land use and change; Landsat; classification; xeric scrub; secondary vegetation; continuous grazing; rotational grazing

1. Introduction

Rangelands are soil or land areas with characteristics for supporting different types of vegetation, including scrub, grassland, “chaparral”, steppe, or prairie (treeless landscapes), which serve as a food source for both domestic herbivores and ungulates [1,2]. They are closely related to extensive grazing and are characterized by the type of vegetation and climate [3]. Globally, they include natural pastures, scrublands, savannahs, and some types of forests such as pine-oak forests [4], covering between 40 and 50% of the world’s land surface [5], and in Mexico, they occupy 58% of the territory [6,7]. Rangelands are considered dynamic systems influenced by multiple factors, such as climate, topography (parent rock, elevation), soil characteristics, overgrazing regimes, fire frequency, climate change, communication routes, the expansion of urbanization, agriculture, livestock, mining, tourism, and extraction [8–11]. In this regard, they contribute to the livelihood of between 1 and 2 billion