



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO**  
**UNIDAD REGIONAL UNIVERSITARIA DE ZONAS ÁRIDAS**



Maestría en Ciencias en Recursos Naturales y Medio Ambiente en Zonas Áridas

**“INFLUENCIA DE VARIABLES ANTROPOGÉNICAS Y CLIMÁTICAS  
SOBRE LA FRAGMENTACIÓN DE ECOSISTEMAS SEMIÁRIDOS  
DEL NORTE DEL ESTADO DE CHIHUAHUA”**

**TESIS**

Que como requisito parcial para obtener el grado de:

**Maestro en Ciencias en Recursos Naturales y Medio Ambiente  
de Zonas Áridas**

Presenta:

**ING. ELENA ALEJANDRA LÓPEZ CASTRO**

Bajo la supervisión de:

**DR. MARTÍN MARTÍNEZ SALVADOR**



**APROBADA**



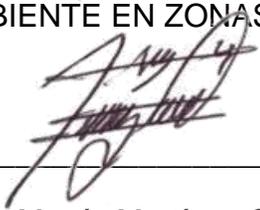
*Bermejillo, Durango, México. Mayo 2020*

**“INFLUENCIA DE VARIABLES ANTROPOGÉNICAS Y CLIMÁTICAS SOBRE  
LA FRAGMENTACIÓN DE ECOSISTEMAS SEMIÁRIDOS DEL NORTE DEL  
ESTADO DE CHIHUAHUA”**

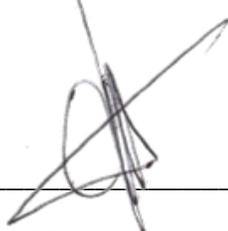
Tesis realizada por Ing. Elena Alejandra López Castro bajo la supervisión del  
Comité Asesor indicado, aprobada por el mismo y aceptada como requisito  
parcial para obtener el grado de:

**MAESTRO EN CIENCIAS EN RECURSOS NATURALES Y MEDIO  
AMBIENTE EN ZONAS ÁRIDAS**

Director: \_\_\_\_\_

  
Dr. Martín Martínez Salvador

Asesor: \_\_\_\_\_

  
M.C. José Manuel Cisneros Vázquez

Asesor: \_\_\_\_\_

  
Dr. Bernardo López Ariza

Bermejillo, Durango, México. Mayo 2020

## CONTENIDO

LISTADO DE CUADROS.....	vi
LISTADO DE FIGURAS.....	vii
DEDICATORIA .....	ix
AGRADECIMIENTOS.....	x
DATOS BIOGRÁFICOS.....	xi
CAPÍTULO I.....	xii
RESUMEN GENERAL.....	xii
GENERAL ABSTRACT.....	xiii
1. INTRODUCCIÓN GENERAL.....	1
2. OBJETIVOS.....	5
2.1. Objetivo General .....	5
2.2. Objetivos Específicos .....	5
3. HIPÓTESIS.....	6
CAPÍTULO II.....	7
1. REVISIÓN DE LITERATURA.....	7
1.1. Medio Ambiente y Recursos Naturales .....	7
1.2. Actividades Antropogénicas y Recursos Naturales .....	8
1.3. Fragmentación del Ecosistema .....	10
1.4. Percepción Remota.....	14
1.4.1. Antecedentes.....	14
1.4.2. Elementos para la Percepción Remota.....	15

1.4.3. Sensores Remotos .....	17
1.5. Landsat.....	21
1.6. Percepción Remota para Evaluación de la Cubierta Vegetal .....	24
1.6.1 Cambios en la Cobertura del Suelo .....	24
1.6.2. Métrica del Paisaje.....	26
1.6.3. Índice de Vegetación NDVI.....	28
2. LITERATURA CITADA .....	31
CAPÍTULO III. ARTICULO CIENTÍFICO.....	36
RESUMEN.....	36
ABSTRACT.....	37
1. INTRODUCCIÓN .....	38
2. OBJETIVOS.....	40
2.1. Objetivo General .....	40
2.2. Objetivos Específicos .....	40
3. HIPÓTESIS.....	40
4. MATERIALES Y MÉTODOS.....	41
4.1. Área de Estudio.....	41
4.2. Descarga de Imágenes Satelitales.....	41
4.3. Análisis NDVI .....	42
4.3.1. Cálculo de Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada .....	42
4.3.2. Comparación de NDVI.....	42
4.3.3. NDVI y Variables Climatológicas .....	43
4.4. Análisis de Cobertura de Uso de Suelo.....	43

4.5. Evaluación de Precisión .....	44
4.6. Matrices de Confusión.....	44
4.6.1. Análisis del Paisaje.....	45
5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	46
5.1. Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada.....	46
5.1.1. Mapas de NDVI .....	46
5.2. Diferencias de índices de Vegetación de Diferencia Normalizada .....	48
5.2.1. Mapas de Diferencias .....	48
5.2.2. Diferencias Mayo 2019 - Mayo 1988 .....	48
5.2.3. Diferencias Agosto 2019 - Septiembre 1988 .....	49
5.2.4 Correlación NDVI y Variables Climáticas.....	49
5.3. Clasificación Supervisado de Uso de Suelo .....	52
5.3.1. Mapas Clasificación Supervisada de Uso de Suelo.....	52
5.3.2. Matrices de Confusión .....	53
5.3.3. Graficas Porcentaje de Cambio .....	56
5.4. Métricas del Paisaje .....	57
6. CONCLUSIONES .....	59
7. LITERATURA CITADA .....	61

## LISTADO DE CUADROS

Cuadro 1. Uso de las Bandas Landsat. ....	23
Cuadro 2. Clasificación de la cobertura de suelo con color de los pixeles.....	44
Cuadro 3. Correlación de Pearson de Variables Climáticas con NDVI. ....	52
Cuadro 4. Matriz de Confusión para mayo de 1988.....	54
Cuadro 5. Matriz de Confusión para septiembre de 1988.....	54
Cuadro 6. Matriz de Confusión para agosto de 2019.....	55
Cuadro 7. Matriz de Confusión para mayo de 2019.....	55
Cuadro 8. Valores y porcentaje relativo de cambio de los coeficientes de variación de la media de tamaño de los parches para mayo 1988–2019, septiembre 1988 y agosto 2019. ....	57
Cuadro 9. Valores y porcentaje relativo de cambio del área de los parches para mayo 1988-2019, septiembre 1988 y agosto 2019. ....	58

## LISTADO DE FIGURAS

Figura 1. Mapa de ubicación del municipio de Janos, Chihuahua. ....	41
Figura 2. Diagrama de Flujo para el Cálculo de NDVI para Janos, Chih. ....	42
Figura 3. Diagrama de Flujo para obtención de las imágenes clasificadas. ....	43
Figura 4. Índice de vegetación de diferencia normalizada mayo de 1988. ....	46
Figura 5. Índice de vegetación de diferencia normalizada mayo de 2019. ....	46
Figura 6. Índice de vegetación de diferencia normalizada septiembre 1988. ...	48
Figura 7. Índice de vegetación de diferencia normalizada agosto 2019. ....	48
Figura 8. Mapa de Janos, Chih. con diferencia de índices de vegetación normalizada para mayo 1988-2019. ....	49
Figura 9. Mapa de Janos, Chih. con diferencia de índices de vegetación normalizada de septiembre 1988 y agosto 2019. ....	49
Figura 10. Relación NDVI y precipitación para Janos, Chih. 1988. ....	50
Figura 11. Relación NDVI y precipitación para Janos, Chih. 2019. ....	50
Figura 12. Relación NDVI y temperatura máxima Janos, Chih. 1988. ....	50
Figura 13. Relación NDVI y temperatura máxima Janos, Chih. 2019. ....	50
Figura 14. Relación NDVI y temperatura mínima Janos, Chih. 1988. ....	51
Figura 15. Relación NDVI y temperatura mínima Janos, Chih. 2019. ....	51
Figura 16. Mapa de clasificación supervisada mayo 1988 de Janos, Chih. ....	53
Figura 17. Mapa de clasificación supervisada mayo 2019 de Janos, Chih. ....	53
Figura 18. Mapa de clasificación supervisada septiembre 1988 Janos, Chih. ...	53
Figura 19. Mapa de clasificación supervisada agosto 2019 Janos, Chih. ....	53

Figura 20. Porcentajes de cambios de uso de suelo en Janos, Chih. mayo de 1988-2019. .... 56

Figura 21. Porcentajes de cambios de uso de suelo en Janos, Chih. en septiembre 1988 y agosto 2019. .... 56

## DEDICATORIA

Dedico especialmente esta tesis a mi familia.

A mi madre **Norma Leticia** quien siempre ha estado detrás de mí, cuidándome y guiándome, para ser la persona que soy hoy en día, ya que en forma incondicional apoyo todas mis ideas. Por ayudarme a levantarme en momentos difíciles y brindarme su cariño en todo momento. I love you, mommy.

A mi padre **Bernardo** quien ha jugado un rol importante, enseñándome la imagen de un profesionalista, figura que algún día alcanzare con trabajo y esfuerzo. Por darme su apoyo, amor dentro y fuera de nuestra alma mater. Te amo papá.

A mis hermanos, **Luis Bernardo**, siempre es mi modelo a seguir como ser humano, alguien que siempre ha cuidado de mí y me ha dado su amor. A mi hermana **Ana Paula**, que muchos de mis propósitos son para darle un buen ejemplo como ser humano y profesionalista. Los amo a los dos.

A mi familia (tíos, primos, sobrinos, etc.) que siempre me dieron amor, fortaleza y apoyo para alcanzar mis sueños y metas. Muchas gracias, los quiero.

A mis amigos que estuvieron en las buenas y en las malas, alentándome para concluir este proyecto, los quiero.

De todo corazón

Elena Alejandra

## AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Autónoma Chapingo en su Unidad Regional Universitaria de Zonas Áridas, por permitirme participar en el posgrado en Recursos Naturales y Medio Ambiente en Zonas Áridas.

Al programa de Becas Nacionales CONACYT (2018-2019) y a la sociedad mexicana, por otorgarme el apoyo económico para mis estudios de maestría.

A mi comité asesor, que me dedicaron tiempo y trabajo para alcanzar la meta de obtener el grado académico.

Al **M.C. Jose Manuel Cisneros** quien me oriento y apoyo en la realización de esta investigación y me abrió las puertas para mi estancia en The University of Arizona, USA.

Al **Dr. Martin Martinez Salvador** el cual me apporto su conocimiento y guía durante la investigación y en el salón de clase.

Al **Dr. Donald Slack** quien gracias a su confianza y apoyo logre hacer mi estancia de investigación en University of Arizona.

Al **Dr. Kamel Didan** y **Dr. Armando Barreto Muñoz** por recibirme en The Vegetation Index & Phenology Laboratory. Gracias por su ayuda y conocimientos.

A los profesores y amigas de mi programa de posgrado, de cada uno de ustedes tome algo que me consolidó como ser humano.

## **DATOS BIOGRÁFICOS**

### **DATOS PERSONALES**

**Nombre:** Elena Alejandra López Castro

**Fecha de Nacimiento:** 30 de julio de 1994

**Lugar de Nacimiento:** Texcoco, Estado de México

**CURP:** LOCE940730MMCPSL09

**Profesión:** Ingeniería en Sistemas Agroalimentarios

**Cédula profesional:** 10844021

### **DESARROLLO ACADÉMICO**

El presente trabajo fue realizado por la C. Elena Alejandra López Castro, quien es originaria del Estado de México. Concluyó sus estudios básicos en la preparatoria La Salle Laguna en el año 2012. Es Ingeniera en Sistemas Agroalimentarios de la Universidad Autónoma Chapingo (UACH) en la Unidad Regional Universitaria de Zonas Áridas. Integrante del Programa de Jóvenes Investigadores (PROFONI) de la UACH. Obtuvo el grado de Ingeniera el año 2016 por Merito Académico al lograr un promedio general de 91 en base 100.

Al egresar, participo en un programa de reforestación y conservación de suelos en el municipio de Ahumada, Chihuahua.

La línea de investigación actualmente se relaciona con Recursos Naturales y Medio Ambiente. Participo en una estancia de investigación en University of Arizona en el último semestre de maestría trabajando en “Vegetation Index & Phenology Laboratory”, bajo la tutoría del PhD. Kamel Didan y PhD. Armando Barreto Muñoz.

## **CAPÍTULO I RESUMEN GENERAL**

### **INFLUENCIA DE VARIABLES ANTROPOGÉNICAS Y CLIMÁTICAS SOBRE LA FRAGMENTACIÓN DE ECOSISTEMAS SEMIÁRIDOS DEL NORTE DEL ESTADO DE CHIHUAHUA**

Los ecosistemas de zonas áridas y semiáridas se caracterizan por su fragilidad ante eventos naturales o antropogénicos. En el norte del estado de Chihuahua el hábitat desértico ha sido impactado negativamente por acciones como: el crecimiento de zonas urbanas, el sobrepastoreo, y el aumento de áreas agrícolas. Además, las sequías han impuesto una situación crítica al medio ambiente. Se reporta un alarmante estado de deterioro: 85% de los predios con sobrepastoreo, 87.5% tienen problemas de erosión y existe una disminución del 12.8% de la superficie sólo en los pastizales medianos. Por lo anterior, el objetivo de esta investigación es identificar la influencia de factores antropogénicos sobre el cambio de uso del suelo y la fragmentación del ecosistema semiárido ubicado en Janos, Chihuahua, mediante percepción remota. Se realizó un estudio para evaluar la fragmentación, cambio y vigor de la vegetación para el periodo de 1988 a 2019. Se realizaron clasificaciones de uso del suelo, cálculos de NDVI, correlaciones entre NDVI con variables climáticas y se derivaron métricas del paisaje, mediante el uso de imágenes de satélite de sensores Landsat TM 4/5 y Landsat 8. Como resultado, se confirmó que los mapas de clasificación permiten identificar los cambios en el ecosistema, las métricas del paisaje se contrapusieron a que existió mayor fragmentación en 2019 que en 1988 y los cambios en tamaño de parche para la temporada de sequía demostraron incrementos del 23% suelo desnudo, 26% vegetación desértica, bosque 198%, agricultura -36%. Para la temporada de lluvia se mostró un incremento del 7% agricultura, 27% suelo desnudo, bosque 546% y -67% vegetación desértica. Los valores de NDVI fueron más altos durante agosto/septiembre en comparación a mayo además existió una correlación positiva entre NDVI con variables climáticas. Este tipo de investigación permitirá monitorear y mitigar los efectos de acciones antropogénicas sobre los recursos naturales.

**Palabras Clase:** Antropogénico, Uso de Suelo, Fragmentación, Percepción Remota, NDVI.

Tesis de Maestría en Ciencias en Recursos Naturales y Medio Ambiente en Zonas Áridas.  
Universidad Autónoma Chapingo  
Autor: Ing. Elena Alejandra López Castro  
Director: Dr. Martín Martínez Salvador

## GENERAL ABSTRACT

### THE INFLUENCE OF CLIMATE AND ANTHROPOGENIC ACTIVITIES IN THE FRAGMENTATION OF THE SEMIARID ECOSYSTEMS IN THE NORTHERN STATE OF CHIHUAHUA

Arid zones are characterized by their vulnerability due to natural events or anthropogenic activities. The desert habitats in the northern part of Chihuahua have negatively been impacted by actions such as the growth of urban areas, overgraze, and the growth of agricultural areas. Also, these ecosystems have been put in critical situations due to the existence of droughts. Various authors have reported alarming conditions of deterioration: 85% of grasslands present overgraze, 87.5% have problems with erosion, and there is a 12.8% decrease in medium grasslands. For these reasons, the objective of this study was to identify the influence of anthropogenic activities in the change of land use and the fragmentation in Janos, Chihuahua, using remote sensing. The investigation evaluated fragmentation, change, and strength of the vegetation for the period of 1988 to 2019. This study included land use classification, NDVI, correlation of NDVI and climate variables, as well as landscape metrics, by using satellite images from Landsat 4/5 TM and Landsat 8. The results, we confirmed that classification maps allowed us to identify the changes in land use. Landscape metrics denied that it exists greater fragmentation in 2019 than in 1988. The change of area patches for dry season revealed an increase of 23% bare soil, 26% desert vegetation, 198% forest and a decrease of 36% in agriculture as in for wet season an increase of 7% agriculture, 27% bare soil, 546% forest and a reduction of 67 % desert vegetation. The NDVI was higher for August/September than it was in May, and a positive correlation was held between NDVI and climate variables. These results will allow us to reduce the impact of anthropogenic activities on more sustainable use of natural resources.

**Key words:** Anthropogenic, Land Cover, Fragmentation, Remote Sensing, NDVI.

Master Science Thesis, Universidad Autónoma Chapingo  
Author: Ing. Elena Alejandra López Castro  
Advisor: Dr. Martín Martínez Salvador

# 1. INTRODUCCIÓN GENERAL

La humanidad enfrenta una crisis ambiental debido al impacto del estilo de desarrollo dominante que pone en peligro la sobrevivencia del hombre y de otras especies (CEPAL, 2016). El problema radica en la sobreexplotación de los recursos naturales acumulado a lo largo de milenios, pero con mayor intensidad en las últimas décadas (Challenger y Dirzo, 2009; Labbate, Seymour, Lauro & Brown, 2016). Las acciones antropogénicas han provocado fragmentación de hábitats, pérdida de biodiversidad, contaminación del suelo, agua y aire, reducción de la calidad y disponibilidad del recurso hídrico, cambio climático, alteración de los ciclos biogeoquímicos, la acidificación de los océanos y la degradación de la capa de ozono (SEMARNAT, 2019).

La fragmentación del paisaje natural debe ser entendida como la división de un ecosistema continuo en pedazos más pequeños y aislados, cuyo resultado es la reducción del área total de hábitat (pérdida de hábitats), la reducción del tamaño de los parches de hábitat y el aumento en el aislamiento (ECOTONO, 1996). La fragmentación puede responder a causas naturales (fuego, tormentas, inundaciones, etc.) o por el impacto directo de actividades antropogénicas (asentamientos humanos, carreteras, presas, áreas agropecuarias, minas, etc.) (Navarro-Rodríguez et al., 2015; Santos y Tellería, 2006). El proceso de fragmentación no responde a procesos fortuitos, normalmente son las áreas más accesibles, las de topografía poco accidentada y las de alta productividad, siendo las primeras en ser alteradas para utilizarlas con fines agrícolas, asentamientos humanos o extracción forestal (Lindenmayer & Fischer, 2006; Granados-Sánchez, López-Ríos y Gama-Flores, 1999; ECOTONO, 1996).

Los ecosistemas de zonas áridas y semiáridas son de los más extensos a nivel global y se caracterizan por su extrema fragilidad ante eventos naturales y/o antropogénicos. Estos hábitats cubren un tercio de la superficie terrestre y proporcionan servicios ecosistémicos críticos a las poblaciones humanas de todo el mundo (Matthew et al., 2020). En México ocupan más del 50% de la superficie

y se estima que albergan unas 6 mil especies vegetales, de las cuales, un poco más del 50% son endémicas (González-Medrano, 2012).

Las zonas áridas y semiáridas en México se distribuyen en el norte y centro del territorio con vegetación caracterizada por matorrales xerófilos, pastizales y bosques espinosos. La destrucción del hábitat desértica es alta, además del incremento en la sobreexplotación de la biodiversidad, incremento de especies invasoras y un mayor daño por impacto del cambio climático (CONABIO, 2006). La ganadería extensiva ha alterado 70% de los matorrales y 95% de los pastizales naturales; provocando la eliminación de especies nativas de alto valor forrajero, y fomentado la dominancia de flora invasora o no apetecible por el ganado y la compactación del suelo, lo que reduce su capacidad de captación de agua. Por otro lado, el desarrollo de grupos poblacionales ejidales y pequeñas propiedades dedicadas a la agricultura de temporal y de riego; así como la extracción y uso del agua para el riego agrícola han provocado la sobreexplotación de los mantos acuíferos (Challenger y Dirzo, 2009; CONABIO, 2009).

La vegetación de la ecorregión del desierto de Chihuahua ha sido utilizada por siglos bajo un sistema de ganadería extensiva. La influencia del pastoreo ha sido importante en las últimas décadas y la historia de su deterioro está ampliamente documentada por diversos autores (Aguirre, 2012). El sobrepastoreo, sin lugar a duda, es un factor de disturbio que conduce a la segmentación y división en parches lo que provoca la pérdida de la biodiversidad y cambios de las condiciones del hábitat (Plue & Cousin, 2013). Además, las sequías severas y recurrentes han impuesto una situación crítica para la productividad de los pastizales, con impactos negativos en la economía del sistema vaca-cría (Pinedo et al., 2013). El crecimiento de la agricultura de riego a expensas de los pastizales se ha incrementado (Gauthier et al., 2003). Estos procesos inducen a un estado de fragmentación que exacerba el progresivo estado de su deterioro; el 85% de los predios presentan sobrepastoreo, 87.5% tienen problemas de erosión y existe

una disminución del 12.8% de la superficie sólo en los pastizales medianos (Royo et al., 2005).

El análisis temporal de un territorio o ecosistema genera información relevante sobre los procesos ecológicos relacionados a la evolución del paisaje (Vázquez et al., 2013). Este conocimiento permite abordar el proceso de fragmentación evaluando sus etapas, los patrones de asentamiento humano y uso de la tierra que los determinan (Gautam, 2003). Existe un número significativo de estudios de fragmentación de los hábitats en ecosistemas forestales (Riitters et al., 2002; Vega-Vela et al., 2018; Valdés, 2011) pero en los últimos años, esta clase de análisis se ha extendido a otros sistemas naturales como matorrales y pastizales (Baldi et al., 2006; De León-Mata, Pinedo-Álvarez, y Martínez-Guerrero, 2014; Kathleen, Robin, Roy & Thompson, 2008; Kemper et al., 2000; Matthew et al., 2020).

El desarrollo tecnológico ha dado los medios para evaluar el paisaje en diferentes escalas. Estos desarrollos incluyen: equipo de cómputo que facilita el manejo de grandes volúmenes de datos, disponibilidad de datos obtenidos mediante sensores remotos, imágenes satelitales y los sistemas de información geográfica (SIG) para almacenar, manipular y mostrar datos espaciales. El monitoreo y evaluación de los hábitats permitirá decisiones objetivas sobre el medio ambiente (Gökyer, 2013).

La percepción remota es relevante cuando se requieren datos distribuidos sobre amplias zonas geográficas, incluyendo información tridimensional o modelos digitales de terreno. Actualmente su aplicación rebasa el ámbito de la ciencia de la tierra y alcance a todas las áreas que utilizan datos espacialmente referenciados (Aguirre, 2009). Los datos y técnicas de percepción remota en combinación con sistemas de información geográfica y métricas del paisaje son fundamentales para analizar y caracterizar la cubierta vegetal y sus cambios (Fichera, Modica & Pollino, 2012).

Existen varias metodologías para estudiar la cobertura vegetal y los cambios estacionales en la vegetación mediante percepción remota. Uno de ellos, son los índices de vegetación bajo la intensidad o cantidad del verde (Chuvieco, 2015). El NDVI es una medida del equilibrio entre la energía recibida y la energía emitida por los objetos en la Tierra. El índice de vegetación NDVI es un parámetro que se obtiene a partir de los valores de reflectancia de las bandas espectrales del rojo (R) y el infrarrojo cercano (NIR) de cualquier sensor satelital, cuyo intervalo de variación, al estar normalizado, queda comprendido entre  $-1$  y  $+1$

La actividad humana en la modificación de ecosistemas naturales y la desordenada ocupación del territorio para fines urbanos o de producción agropecuarias ha exacerbado el efecto de los fenómenos naturales, causando desastres con costos sociales y económicos muy elevados (Sarukhán et al., 2017). El evaluar la fragmentación de hábitats, en ecosistemas áridos y semiáridos de la región norte del estado de Chihuahua, por actividades antropogénicas mediante percepción remota dará información que permitirá mitigar los efectos del hombre y promover un aprovechamiento sustentable de los recursos naturales.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1. Objetivo General**

Identificar la influencia de factores antropogénicos sobre el cambio de uso del suelo y la fragmentación del ecosistema semiárido ubicado en el municipio de Janos, Chihuahua.

### **2.2. Objetivos Específicos**

- Desarrollar mapas temáticos de cobertura del suelo derivados de imágenes satelitales Landsat 4/5 TM y Landsat 8, a fin de determinar los cambios del uso del suelo.
- Calcular la fragmentación de los ecosistemas ubicados en el municipio de Janos, Chihuahua a partir de los mapas temáticos de cobertura del suelo.
- Realizar un análisis espaciotemporal del ecosistema en el municipio de Janos, Chihuahua, a través del uso de índices de vegetación (NDVI).
- Calcular la correlación entre el índice de vegetación NDVI y variables climáticas como precipitación, temperatura máxima y temperatura mínima.

### **3. HIPÓTESIS**

Las actividades antropogénicas generan cambios de uso del suelo y la fragmentación de los ecosistemas semiáridos del norte de México.

En esta investigación se evaluó el efecto de las actividades antropogénicas a través de las siguientes hipótesis:

- Los cambios en el uso del suelo pueden ser identificados a través de mapas de clasificación de uso del suelo.
- Las métricas del paisaje presentan una mayor fragmentación en 2019 que en 1988.
- Los valores de NDVI son más altos en la temporada de lluvia (agosto/septiembre) que en la temporada de sequía (mayo).
- Existe una correlación entre el NDVI y las variables climáticas precipitación, temperatura máxima y temperatura mínima.

## **CAPÍTULO II**

### **1. REVISIÓN DE LITERATURA**

#### **1.1. Medio Ambiente y Recursos Naturales**

El desarrollo humano durante la última etapa del siglo XX y principios del XXI a nivel global, contradice los principios básicos de la sustentabilidad. El mismo es insostenible a corto, mediano y largo plazo. Lo muestra el aumento sin precedentes de la desigualdad en la distribución de la riqueza al interior de los países y entre las regiones del mundo, así como la crisis ambiental producto de las acciones del hombre, situaciones naturales y el cambio climático. El medio ambiente y sus recursos naturales han servido como sustento de los grupos humanos desde su origen. El hombre obtiene bienes diversos como alimentos, agua, madera y fibras para la construcción, leña como fuente de energía, y pulpa de madera para papel, entre otros (SEMARNAT, 2019).

La relación de la humanidad con el medio ambiente se da con una visión de la naturaleza como proveedora de bienes y servicios que se utilizan incluso hasta el nivel de extinción (o agotamiento). La magnitud del impacto que ha tenido el hombre con relación a los ecosistemas, se puede expresar de varias formas: desde la transformación completa de los ecosistemas para otros usos (como cuando se destruyen los bosques para dedicarlos a la agricultura); en forma de su alteración o degradación parcial (como la que causa la ganadería extensiva que deja a los animales libres para que se alimenten de la vegetación natural), o bien, con la alteración permanente mediante asentamientos o desarrollo urbanos (SEMARNAT, 2011).

El término biodiversidad o diversidad biológica se refiere a la variedad de formas de vida, que pueden manifestarse como genes, individuos, poblaciones, especies y comunidades hasta ecosistemas y paisajes, incluyendo los procesos que se desarrollan entre estos niveles (Jiménez-Sierra et al. 2014).

Por ocupar más del 50% de la superficie de México, las zonas áridas y semiáridas representan uno de los ecosistemas más importantes, en donde se tiene un frágil equilibrio para el aprovechamiento de los recursos naturales. Se estima que albergan unas 6 mil especies vegetales, de las cuales, un poco más del 50 % son endémicas, es decir, restringidas a nuestra nación. Todas estas plantas constituyen comunidades muy diversas, con gran diversidad en sus formas de vida, clara expresión de sus estrategias adaptativas para un ambiente tan selectivo, y muchas de ellas con una utilidad real o potencial (González-Medrano, 2012).

## **1.2. Actividades Antropogénicas y Recursos Naturales**

El ser humano ha dependido, para su desarrollo y evolución, de los servicios que la biosfera y sus ecosistemas le han brindado (Sarukhán et al. 2017). El primer impacto del ser humano sobre el ambiente comenzó cuando pasa de un sistema de vida trashumante a uno más sedentario, en donde inicia con la domesticación de especies de plantas y animales (Fernandes, S/F). En los últimos dos siglos el impacto de las actividades humanas en la tierra ha crecido enormemente, alterando paisajes enteros y, en última instancia, impactando los ciclos hidrológicos y nutritivos de la tierra, así como el clima. La crisis ambiental producto de acciones antropogénicas se traduce en deforestación, desertificación, pérdida de biodiversidad, alteración del clima y del ciclo del carbono (Sherbinin, 2002).

El problema central en la actualidad es el estado de sobreexplotación de la biodiversidad y los ecosistemas producto de un profundo impacto antropogénico, acumulado a lo largo de milenios, pero con mayor intensidad en las últimas décadas (Challenger y Dirzo, 2009). La principal consecuencia de la pérdida, reducción o alteración de los ecosistemas es la disminución o el cese de la producción de sus bienes y servicios ambientales. Es necesario preguntar hasta qué punto la transformación y alteración que se ha ocasionado en los ecosistemas ha afectado la producción de sus servicios ambientales (SEMARNAT, 2007).

El hombre, sin lugar a duda, sustenta su existencia en los servicios ecosistémicos y del acceso a los mismos. Se pueden identificar dos grandes tipos de ecosistemas: los naturales como las selvas, los bosques, los manglares, los arrecifes, etc., y los ecosistemas antropizados, modificados por nuestra especie, como son los campos agrícolas, las plantaciones forestales, los sistemas de acuicultura y en cierta forma también los centros urbanos. Estos ecosistemas, junto con las especies que los constituyen y su variación genética, es a lo que llamamos biodiversidad (Sarukhán et al. 2017).

En el norte y parte del centro de México se encuentran las zonas áridas y semiáridas, con vegetación caracterizada por los matorrales xerófilos, pastizales y bosques espinosos. Un problema significativo en estas regiones es la degradación de los suelos, así como las áreas destinadas a la agricultura de temporal. Por otro lado, la ganadería extensiva ha alterado 70% de los matorrales y 95% de los pastizales naturales; provocando la eliminación de especies nativas de alto valor forrajero, fomentado la dominancia de flora invasora, flora no apetecible por el ganado y la compactación del suelo, lo que reduce su capacidad de captación de agua (CONABIO, 2006).

En los ecosistemas de la zonas áridas y semiáridas también se manifiesta el impacto de las actividades antropogénicas. Se habla de un efecto mínimo en tiempos prehispánicos sobre la flora y fauna, ya que se tenía poblaciones nómadas que vivían de la caza y recolección. Con la Colonia y la introducción del ganado empezaron los impactos de mayor magnitud. Además, las especies maderables como el mezquite fueron aprovechadas de manera poco racional como una fuente de leña. Desde el Porfiriato y hasta nuestros días, la cría extensiva de bovinos orientada al mercado estadounidense ocupa grandes extensiones del ecosistema con un deficiente manejo del ganado en el agostadero que afecta la vegetación por sobrepastoreo, al suelo generando su compactación y erosión. Con el crecimiento de grupos poblacionales en el norte de México, se inicia la creación de ejidos y distritos de riego derivados del reparto agrario, también se promueve la extracción y uso del agua para el riego agrícola,

llegando a la sobreexplotación de los mantos acuíferos. El reciente auge de la industria maquiladora y de las ciudades fronterizas con Estados Unidos, ha redundado en más pérdidas de superficie de los ecosistemas de las zonas áridas y semiáridas de México, y en una serie de problemas de contaminación del suelo, agua y aire (CONABIO, 2009).

### **1.3. Fragmentación del Ecosistema**

La pérdida de especies de flora y fauna por efecto de la actividad antropogénica está generando serios problemas ambientales, comparable a los cinco eventos de extinción masiva en el mundo. Esta crisis ambiental tiene su origen en la modificación del medio ambiente y la pérdida de hábitats resultado de las actividades del hombre en diferentes ecosistemas (Lindenmayer & Fischer, 2006).

La fragmentación del paisaje natural debe ser entendida como la división de un ecosistema continuo en pedazos más pequeños y aislados, cuyo resultado es la reducción del área total de hábitat (pérdida de hábitats), la reducción del tamaño de los parches de hábitat y el aumento en el aislamiento (ECOTONO, 1996).

La fragmentación y la consecuente pérdida de hábitat dañan la conservación y mantenimiento de la biodiversidad en todos los ecosistemas. La fragmentación es la pérdida de continuidad de un ecosistema, y produce cambios importantes en la estructura de las poblaciones y comunidades de plantas y animales, tanto en el ambiente físico como en el ecológico, lo que afecta su funcionamiento y con daños irreversibles (Navarro-Rodríguez et al., 2015; Santos y Tellería, 2006).

De acuerdo con la SEMARNAT (2019), se identifican 3 procesos que impactan en diferentes niveles a los ecosistemas: la deforestación (cambio permanente de una cubierta dominada por árboles hacia una que carece de ellos), la alteración (también denominada degradación, que es una modificación inducida por causas humanas, pero sin el reemplazo total de la vegetación) y la fragmentación (la transformación del paisaje en parches pequeños de vegetación original rodeados de superficie alterada).

La pérdida o fragmentación de los ecosistemas se lleva a cabo por medio del cambio de uso del suelo, que se define como el proceso por el cual se cambia el uso que se da a una superficie determinada y su cubierta vegetal a otro distinto, lo que promueve potencialmente la desaparición de grandes superficies de ecosistemas naturales, con lo cual se pierden numerosos hábitats, y con ello, la riqueza de especies de flora y fauna de los sitios afectados (SEMARNAT, 2011).

El proceso de fragmentación no responde a procesos fortuitos, normalmente son las áreas más accesibles, las de topografía poco accidentada y las de alta productividad, las primeras en ser alteradas para utilizarlas con fines agrícolas, asentamientos humanos o extracción forestal (Lindenmayer & Fischer, 2006; Granados-Sánchez, López-Ríos y Gama-Flores, 1999; ECOTONO, 1996).

Acorde con Santos y Tellería (2006), la fragmentación y destrucción de un hábitat produce un cambio progresivo en la configuración del paisaje que puede llevar a los siguientes escenarios:

- Una pérdida regional en la cantidad de hábitat, con la consiguiente reducción del tamaño de las poblaciones de los organismos afectados. Disminuye la densidad regional de las especies, el número de individuos por unidad de superficie en toda la región considerada.
- Una disminución del tamaño medio y un aumento del número de los fragmentos de hábitat resultantes. Esta tendencia reduce progresivamente el tamaño de las poblaciones mantenidas por cada uno de los fragmentos, aumentando así el riesgo de que alcancen un umbral por debajo del cual son inviables.
- Un aumento de la distancia entre fragmentos, con la consiguiente dificultad para el intercambio de individuos entre las poblaciones aisladas, así como para reponerse, por recolonización, de una eventual extinción.
- Se produce un aumento de la relación perímetro/superficie y, por consiguiente, una mayor exposición del hábitat fragmentado a múltiples interferencias procedentes de los hábitats periféricos, conocidos

genéricamente como “matriz de hábitat”. Se da así un creciente efecto de borde que origina un deterioro de la calidad del hábitat en regresión, afectando a la supervivencia de las poblaciones en los fragmentos.

Normalmente el cambio de uso del suelo de los ecosistemas por actividades antropogénicas es para el desarrollo de zonas urbanas, medios de comunicación, actividades agrícolas, ganaderos, industriales, turísticas, petroleras, mineras, etc., Este cambio no se restringe solo a zonas de bosques, también se presenta en humedales, pastizales o vegetación de zonas áridas. Por ejemplo, los pastizales naturales que se encuentra en grandes áreas del desierto Chihuahuense o Sonorense del norte de México o en las partes altas de las montañas se transforman en zonas con fines ganaderos, los cuales, muchas veces consumen completamente las especies nativas de pasto, impidiendo su regeneración. También es común que se queme la cubierta vegetal para utilizar los terrenos en actividades agropecuarias. La pérdida de pastizales, además de sus efectos sobre las plantas, pone en riesgo la supervivencia de especies endémicas (CONABIO, 2006).

Sarukhán et al (2017) señalaron que “el impacto de la actividad humana en la modificación de ecosistemas naturales y la desordenada ocupación del territorio para fines urbanos o de producción agropecuarias ha exacerbado el efecto de los fenómenos naturales, causando desastres con costos sociales y económicos muy elevados Aunque en términos absolutos el área ocupada por desarrollos urbanos es mucho menor que aquella que la actividad agropecuaria ha transformado históricamente, la tasa de expansión de las zonas urbanas a costa de los ecosistemas naturales en las últimas dos décadas ha sido mucho mayor (3.69% anual) que la tasa de expansión de la frontera agropecuaria (0.7% anual) para el mismo periodo”.

En el estado de Chihuahua, las zonas áridas y semiáridas son los ecosistemas predominantes, mismos que son afectados mediante la fragmentación o pérdidas de hábitat resultado de actividades antropogénicas: la cría extensiva de bovinos de carne que aprovecha grandes áreas de pastizales naturales e inducidos, el

desarrollo de grupos poblacionales ejidales y pequeñas propiedades dedicadas a la agricultura de temporal y de riego, el crecimiento de zonas urbanas que demandan servicios para la población y un conjunto de actividades económicas (industria maquiladora) que acarrearán problemas de contaminación del aire, agua y suelo (Challenger y Dirzo, 2009).

En particular, la vegetación de la ecorregión del desierto de Chihuahua ha sido utilizada por siglos bajo un sistema de ganadería extensiva. La influencia del pastoreo ha sido importante en las últimas décadas y la historia de su deterioro está ampliamente documentada por diversos autores (Aguirre, 2012). El sobrepastoreo, sin lugar a duda, es un factor de disturbio que conduce a la segmentación y división en parches lo que provoca la pérdida de la biodiversidad y cambios de las condiciones del hábitat (Plue & Cousin, 2013). Además, las sequías severas y recurrentes han impuesto una situación crítica para la productividad de los pastizales, con impactos negativos en la economía del sistema vaca-cría (Pinedo et al., 2013).

La expansión de la agricultura de riego a expensas de los pastizales se ha incrementado en forma considerable (Gauthier et al., 2003). El incremento en áreas agrícolas se debe a los cambios tecnológicos y condiciones de mercado de algunos productos agrícolas que imponen una seria amenaza a las todavía grandes extensiones de tierras de pastizales. Estos procesos inducen a un estado de fragmentación que exacerba el progresivo estado de su deterioro; el 85% de los predios presentan sobrepastoreo, 87.5% tienen problemas de erosión y existe una disminución del 12.8% de la superficie sólo en los pastizales medianos (Royo et al., 2005).

Existe un número significativo de estudios de fragmentación de los hábitats en ecosistemas forestales (Riitters et al., 2002; Vega-Vela et al., 2018; Valdés, 2011) pero en los últimos años, esta clase de análisis se ha extendido a otros sistemas naturales como matorrales y pastizales (Baldi et al., 2006; De León-Mata, Pinedo-Álvarez, y Martínez-Guerrero, 2014; Kathleen, Robin, Roy & Thompson, 2008; Kemper et al., 2000; Matthew et al., 2020).

Los ecosistemas de zonas áridas y semiáridas cubren un tercio de la superficie terrestre y proporcionan servicios ecosistémicos críticos a las poblaciones humanas de todo el mundo. El aumento directo de las actividades antropogénicas en estos hábitats es una amenaza para la flora y fauna de estos ecosistemas, por lo que se crea la necesidad urgente de comprender mejor su biodiversidad, función, mecanismos de cambio, ciclos biogeoquímicos y distribución actual (Matthew et al., 2020).

El cambio de uso de suelo y su impacto negativo en especies de flora y fauna por actividades antropogénicas en ecosistemas de zonas áridas y semiáridas obliga a desarrollar investigaciones que permitan medir la fragmentación del hábitat para encontrar mecanismos que puedan mitigar su efecto buscando lograr un manejo sustentable de los recursos naturales.

#### **1.4. Percepción Remota**

##### **1.4.1. Antecedentes**

El mundo circundante es percibido a través de los cinco sentidos. Algunos sentidos (por ejemplo, el tacto y el gusto) necesitan el contacto con los objetos y otros como la vista y la audición no lo requieren. El ser humano lleva a cabo percepción remota con algunos de los sentidos (Weng, 2014).

La percepción remota es un área multidisciplinaria que permite la observación, exploración y monitoreo de la superficie terrestre. Mediante sensores remotos se obtiene información referente al espectro electromagnético que permite caracterizar diferentes elementos de la tierra (Chuvienco, 2015). Para Peguero-Orta (2012) es una tecnología basada en el muestreo de la energía electromagnética reflejada o emitida por los diferentes tipos de cobertura de la Tierra.

La NASA (2015) define percepción remota como la obtención de información de un objeto desde la distancia. Una fotografía es una forma muy común de percepción remota. Hay diferentes formas para coleccionar información y diferentes

sensores son usados dependiendo de la aplicación. Para Aguirre (2009) la percepción remota permite inferir datos de un objeto o del ambiente físico sin estar en contacto directo con ellos y resultan de gran importancia cuando se requieren datos distribuidos sobre amplias zonas geográficas, ya sea información tridimensional o modelos digitales de terreno.

La percepción remota es una técnica aplicada y como tal es dependiente del desarrollo tecnológico existente en cada momento, por lo que las formas de percepción remota han variado considerablemente en las últimas décadas. El crecimiento del área ha sido posibilitado por la cantidad y calidad de la información disponible para diferentes áreas del conocimiento.

#### **1.4.2. Elementos para la Percepción Remota**

La percepción remota se basa en cuatro elementos: a) fuente de radiación; b) trayectoria o medio de transmisión; c) objetivo o blanco, y d) sensor (Aguirre, 2009). Chuvieco (2015) describe seis componentes en un sistema de teledetección espacial:

- *Una fuente de energía*, que se constituye en el origen del flujo energético que debe ser detectado por el sensor. Puede tratarse de un foco externo al mismo, en cuyo caso se habla de teledetección pasiva, o de un haz energético emitido por este (teledetección activa). La fuente de energía más importante es la energía solar.
- *La superficie terrestre*, que se constituye en el blanco de observación de los sistemas de percepción remota. Está formada por rocas, sedimentos, suelos, distintas masas de vegetación, agua o construcciones humanas, que reciben la señal energética procedente del sol o el sensor, y la reflejan o emiten de acuerdo con sus características físicas.
- *Un sistema sensor*, compuesto por el sensor propiamente dicho, y la plataforma que lo sustenta (avión, satélite). Tiene como función captar la energía procedente de los diversos materiales que constituyen la

superficie terrestre, codificarla y grabarla, o enviarla directamente a un sistema de recepción terrestre.

- *Un sistema de recepción-comercialización*, en donde se reciben los datos transmitidos desde la plataforma, se les realizan ciertas correcciones, y se graban en un formato y en un medio apropiados, para hacerlos accesibles a sus usuarios potenciales.
- *Un analista quien se encarga de procesar e interpretar* esta información en formato digital, para generar imágenes analógicas o digitales, que se constituyen en claves temáticas o cuantitativas, orientadas a facilitar la evaluación del problema en estudio.
- Un usuario final quien analiza los productos generados por el analista, para generar un mapa temático que puede ser resultado del proceso de foto-interpretar las imágenes de percepción remota, o de la conjunción de dicho proceso con trabajo de campo.

De acuerdo con estos componentes podemos decir que la percepción remota permite obtener información sobre objetos o fenómenos del sistema terrestre a partir de imágenes adquiridas a distancia, mediante mediciones de energía electromagnética reflejada o emitida por esos objetos o fenómenos de interés, desde plataformas espaciales.

La energía que la tierra recibe del sol es llamada radiación electromagnética. Esta radiación es reflejada, absorbida y emitida por la atmosfera terrestre. Los sensores de los satélites están calibrados para detectar varias longitudes de onda a lo largo del espectro electromagnético, incluida la luz visible. Los materiales reflejan o absorben diferentes longitudes de onda de la radiación electromagnética. Debido a esto, se puede observar las ondas electromagnéticas reflejadas detectadas por el sensor y determinar el tipo de material que está reflejando, esto es conocido como firma espectral (NASA, 2015).

La radiación electromagnética es el principio físico para la percepción remota, este es el flujo energético que se establece entre el objeto (en este caso los

materiales que constituyen la superficie terrestre) y el sensor. La imposibilidad de separar esta radiación de la materia y otras formas de energía inevitablemente significa que cuando la radiación electromagnética y la materia interactúan, ambas son modificadas de alguna manera. La región del espectro electromagnético que interesa a la mayoría de los sistemas de percepción remota se conoce como espectro óptico. Esta porción reflejada se divide en tres subregiones: visible, infrarrojo próximo e infrarrojo medio. Entre 0.38 y 0.72  $\mu\text{m}$ , el espectro recibe el nombre de visible, porque corresponde con la región en que el ojo humano es capaz de percibir la radiación electromagnética. Suelen distinguirse tres bandas elementales, que se denominan azul (0.38 a 0.5  $\mu\text{m}$ ), verde (0.5 a 0.6  $\mu\text{m}$ ) y rojo (0.6 a 0.72  $\mu\text{m}$ ), debido a los colores elementales asociados con tales porciones de longitudes de onda. El rango entre 0.72 y 1.3  $\mu\text{m}$  es conocido como infrarrojo próximo, y aquel comprendido entre 1.3 y 3.0  $\mu\text{m}$  como infrarrojo medio (Villegas-Vega, 2008).

### **1.4.3. Sensores Remotos**

Un sensor es un dispositivo que detecta y mide parámetros físicos tales como radiación y los convierte en una forma en la cual pueden ser almacenados o transmitidos. Es un dispositivo que “ve” los objetos o el terreno al cual es apuntado. Aunque los dispositivos que perciben gravedad, campos magnéticos u ondas de sonido, pueden ser correctamente clasificados como sensores remotos, muchos autores restringen el uso de percepción remota para describir mediciones de radiación electromagnética (Butler, Mouchot, Barale & LeBlanc, 1990).

La energía reflejada o emitida por la superficie terrestre sigue su trayectoria de regreso a través de la atmósfera, donde se atenúa por dispersión. Esta señal puede ser captada por sensores remotos aerotransportados o a bordo de satélites (Aguirre, 2009).

La NASA (2015) establece que los satélites tienen diferentes características y pueden ser clasificados bajo los siguientes criterios:

- De acuerdo con el tipo de órbita se pueden agrupar en órbita polar y no polar.
- Con relación a la fuente emisora de energía, se dividen en sensores pasivos y activos.
- Por el tipo de resolución y calidad estos pueden tener resolución espacial, temporal, espectral y radiométrica.

Los satélites de órbita polar proveen, cobertura global y la frecuencia de medición puede variar de una medición por día a una medición por mes. En contraste, los satélites no-polar orbitales no proveen cobertura global y la medición de frecuencia puede variar de unas pocas horas a semanas.

Por su fuente de energía, los sensores pasivos dependen de cambios en la gravedad y la radiación emitida de la tierra. Ejemplos de este tipo de sensores son: Landsat, MODIS (Terra/Aqua), AIRS(Aqua) y GRACE. En cambio, los sensores activos cuentan con un instrumento que envía haces de radiación y mide el retorno, por ejemplo, Radar y LiDAR.

La resolución depende de la configuración de la órbita del satélite y el diseño del sensor. Los sensores tienen diferentes resoluciones. La resolución espacial es el área geográfica cubierta por un píxel en una imagen de satélite. Generalmente, entre más alta sea la resolución espacial, menor será el área cubierta por un píxel. La resolución temporal es el tiempo que tarda un satélite en registrar la misma área con el mismo ángulo una segunda vez. Esta depende del satélite y las capacidades del sensor, el traslape de la ruta y la latitud del satélite. La resolución espectral describe la habilidad del sensor para detectar intervalos de longitud de onda. Los instrumentos detectan diferentes rangos de longitud de onda en el espectro electromagnético, que son referidas como bandas. Por ejemplo, Landsat cuenta con 7-11 bandas, dependiendo si se trata de Landsat 4/5 TM o Landsat 8, MODIS cuenta con 36 bandas, y AVIRIS con 256 bandas. Por último, la resolución radiométrica describe la habilidad del sensor para discriminar las diferencias en energía. Entre mejor sea la resolución radiométrica,

más sensitivo será el sensor a pequeñas diferencias en energía. Algunos ejemplos son MODIS que tiene un sensor de 12 bits y puede discriminar 4096 niveles de brillo, AVHRR cuenta con un sensor de 10 bit que le permite reconocer 1024 niveles, Landsat TM cuenta con un sensor de 8 bits que posibilita diferenciar 64 niveles de brillo (NASA, 2015).

Los datos de imágenes de satélite están disponibles en diferentes niveles de procesamiento, que van de datos sin procesar a productos que permiten visualizar información. La NASA (2019) ha recopilado datos de satélites para procesarlos y hacerlos más útiles para un rango amplio de aplicaciones. Hay un conjunto de terminologías que la NASA usa para referirse a los niveles de procesamiento de datos de imágenes de satélite:

- Nivel 0 y 1: son los datos que graba el instrumento que pueden ser referenciados por fecha de adquisición. Son los más difíciles de usar.
- Nivel 2: los datos han sido convertidos a una cantidad geofísica a través de un algoritmo computacional. Estos datos están georreferenciados y calibrados. A estos datos se les ha aplicado una corrección atmosférica y están listos para obtener variables biofísicas como NDVI.
- Nivel 3: es el nivel en el que los datos de nivel 2 han sido mapeados en forma espacio-temporal y con control de calidad.
- Nivel 4: es el nivel 3 que ha sido combinado con modelos y otros datos de instrumentos.

Las ventajas de usar percepción remota incluyen el proveer información donde no se cuenta con medidas de referencia, así como observaciones consistentes a nivel global, además de proveer direcciones sobre dónde colocar sensores para mediciones de referencia y monitorear de manera continua nuestro planeta. En contraste, la percepción remota presenta algunas desventajas tales como la obtención de imágenes de satélite con alta resolución espacial, temporal, espectral y radiométrica al mismo tiempo. Los satélites con una baja resolución espacial tienden a tener alta resolución temporal, y los satélites con alta

resolución espacial tienden a tener una baja resolución temporal. Además, grandes cantidades de datos en una variedad de formatos pueden llevar más tiempo para su procesamiento, y la aplicación de datos de satélite puede requerir un procesamiento adicional, visualización y otras herramientas (NASA, 2015).

Camara-Sanchez (2005) refiere que de acuerdo con la plataforma donde se ubique el sensor, se distinguen dos grandes tipos de sistemas de percepción remota: percepción remota aérea y percepción remota espacial.

- La *Percepción Remota Aérea* se obtiene a partir de las plataformas como: globo, avión y helicóptero. Los sensores comúnmente usados son: cámara fotográfica, cámara multibanda, cámara digital, cámara de video, barredor multiespectral y barredor térmico. Las fotografías aéreas son las imágenes de percepción remota más comúnmente utilizadas. Son usadas para el análisis de todo tipo de recursos naturales, cartografía y estudios de los sectores públicos y privados. Las ventajas básicas que ofrece esta técnica son: permite tener una vista de los detalles de la superficie terrestre a menor escala que la imagen satelital, mayor flexibilidad ya que es más fácil rediseñar el plan de trabajo según las necesidades que vayan surgiendo, y la fotografía da una visión instantánea de procesos bajo condiciones dinámicas (inundaciones, derrames de petróleo, tráfico, incendios, etc.).
- La *Percepción Remota Espacial* es aquella que se obtiene a partir de las plataformas que pueden ser naves espaciales tripuladas, estaciones orbitales o satélites autónomos, que giran alrededor de la tierra en órbitas polares, oblicuas o ecuatoriales. Sus ventajas son: la visión sinóptica, la periodicidad en la toma de datos, el sincronismo con el sol y el bajo costo por hectárea de los datos generados. Algunos de los sistemas satelitales más usados son: Landsat (USA), SPOT (Francia), ERS (Europa), IKONOS, RADARSAT (Canadá) y JERS-1 (Japón).

La percepción remota es de gran importancia cuando se requieren datos distribuidos sobre amplias zonas geográficas, incluyendo información

tridimensional o modelos digitales de terreno, ha permitido que en la actualidad su aplicación rebase el ámbito de la ciencia de la tierra y alcance a todas las áreas que utilizan datos espacialmente referenciados. Hay numerosos ejemplos donde la aplicación de las técnicas ha resultado exitosa, en áreas como: la medicina humana y veterinaria, la geología, la arqueología, ingeniería ambiental y desarrollos urbanos, entre muchas otras (Aguirre, 2009).

### **1.5. Landsat**

Existen diferentes programas que permanentemente están monitoreando la superficie terrestre mediante satélites, Landsat en USA es el más antiguo, mismo que proporciona información multiespectral (óptica y térmica) sobre la superficie de la Tierra (Romano, 2018). El programa Landsat ofrece el registro global continuo más largo de la superficie de la Tierra mediante imágenes de satélite. Desde su origen ha generado y archivado imágenes de la superficie terrestre; este archivo de datos ofrece al científico la capacidad de evaluar los cambios en el paisaje de la Tierra. Los sensores Landsat tienen una resolución espacial moderada. No se pueden ver casas individuales en una imagen de Landsat, pero se pueden ver grandes objetos artificiales como carreteras o bien objetos naturales como cuerpos de agua. Landsat presenta una resolución espacial importante porque es lo suficientemente gruesa para la cobertura global, y lo suficientemente detallada como para caracterizar procesos a escala humana como el crecimiento urbano (NASA, 2019; USGS, 2015).

En 1972 se lanzó al espacio el ERTS-1 (Earth Resources Technology Satellite), siendo el primer satélite para la prospección de recursos naturales. Este sistema fue renombrado posteriormente como Landsat-1, el cual es un acrónimo de su aplicación (land: tierra y sat: satélite). Esta plataforma transportaba un sensor similar a una cámara de televisión llamado RBV (Return Beam Vidicon); y un barredor multiespectral MSS (Multiespectral Scanner). Esta fue la primera estación espacial y fue usada para producir mapas de uso del suelo, utilizando fotografías en formato de 35 y 70 mm. (Aguirre, 2009).

Los satélites Landsat llevan a bordo diferentes instrumentos. Su evolución buscó siempre captar más información de la superficie terrestre, con mayor precisión y detalle, de ahí las mejoras radiométricas, geométricas y espaciales que se incorporaron a los sensores pasivos; el primero, conocido como Multispectral Scanner Sensor (MSS), seguido de Thematic Mapper (TM) que tiene mayor sensibilidad radiométrica que su antecesor, Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+) que entre sus mejoras técnicas destaca una banda espectral (pancromática) con resolución de 15 metros. El satélite Landsat-8 lleva a bordo dos sensores de imágenes: Operational Land Imager (OLI) y Thermal Infrared Sensors /TIIRS). Las imágenes Landsat, de acuerdo con el sensor pueden estar compuestas de 4 (Landsat-1, 2, 3) hasta 11 bandas espectrales (Landsat-8). Dependiendo del satélite y sensor, incluyen una banda pancromática, rango visible, una o más bandas infrarrojas, y una o dos bandas térmicas. Las resoluciones espaciales varían entre 15, 30, 60 y 120 según el sensor y banda. Son de utilidad para el monitoreo de la vegetación, aplicaciones geológicas, en el estudio de los recursos naturales y de cultivos (INEGI, 2019).

Los satélites Landsat-7 y Landsat-8 orbitan la Tierra a una altitud de 705 kilómetros (438 millas) en una franja de 185 kilómetros (115 millas), moviéndose de norte a sur sobre el lado iluminado por el sol de la Tierra en una órbita síncrona. Cada satélite hace una órbita completa cada 99 minutos, completa alrededor de 14 órbitas cada día y cruza cada punto de la Tierra una vez cada 16 días. Aunque cada satélite tiene un ciclo de cobertura de la Tierra completa de 16 días, sus órbitas se compensan para permitir la cobertura repetida de 8 días de cualquier área de la escena de Landsat en el mundo. Entre los dos satélites, se añaden más de 1,000 escenas al archivo del USGS cada día. Landsat 4 y 5 siguió la misma órbita que los Landsat 7 y 8, mientras que los Landsat 1, 2 y 3 orbitaban a una altitud de 920 kilómetros (572 millas), dando vueltas por la Tierra cada 103 minutos, produciendo una cobertura repetida cada 18 días (USGS, 2015).

Los datos de Landsat respaldan una amplia gama de aplicaciones, en áreas como la investigación de cambios globales, la agricultura, la silvicultura, la geología, la cartografía de la cobertura de la tierra, la gestión de recursos, el agua y los estudios costeros. Las actividades específicas de monitoreo ambiental, como la investigación de la deforestación, los estudios de flujo volcánico y la comprensión de los efectos de los desastres naturales, se benefician de la disponibilidad de datos de Landsat. En los últimos años, los datos de Landsat también se han utilizado para rastrear derrames de petróleo y para monitorear la contaminación de los desechos de minas. En el Cuadro 1 (NASA, 2019) se enumera las bandas de Landsat y describe el uso de cada banda para ayudar a los usuarios a determinar las mejores bandas para usar en el análisis de datos.

Cuadro 1. Uso de las Bandas Landsat.

Band name	Uses of Landsat bands					Description of use
	L8 OLI/TIRS	L7 ETM+	L4-5 TM	L4-5 MSS	L1-3 MSS	
Coastal/Aerosol	Band 1	--	--	--	--	Coastal areas and shallow water observations; aerosol, dust, smoke detection studies.
Blue (B)	Band 2	Band 1	Band 1	--	--	Bathymetric mapping; soil/vegetation discrimination, forest type mapping, and identifying manmade features.
Green (G)	Band 3	Band 2	Band 2	Band 1	Band 4	Peak vegetation; plant vigor assessments.
Red (R)	Band 4	Band 3	Band 3	Band 2	Band 5	Vegetation type identification; soils and urban features.
Near-Infrared (NIR)	Band 5	Band 4	Band 4	Band 3	Band 6	Vegetation detection and analysis; shoreline mapping and biomass content.
	--	--	--	Band 4	Band 7	
Shortwave Infrared-1 (SWIR-1)	Band 6	Band 5	Band 5	--	--	Vegetation moisture content/drought analysis; burned and fire-affected areas; detection of active fires.
Shortwave Infrared-2 (SWIR-2)	Band 7	Band 7	Band 7	--	--	Additional detection of active fires (especially at night); plant moisture/drought analysis.
Panchromatic (PAN)	Band 8	Band 8	--	--	--	Sharpening multispectral imagery to higher resolution.
Cirrus	Band 9	--	--	--	--	Cirrus cloud detection.
Thermal (T)	Band 10	Band 6	Band 6	--	--	Ground temperature mapping and soil moisture estimations.
	Band 11			--	--	

Las imágenes multiespectrales creada por este sistema satelital se captan mediante un sensor digital que mide la reflectancia en muchas bandas. Cada banda según sus características ofrece ventajas para el reconocimiento de determinados objetos de la superficie en función al comportamiento espectral de los mismos (NASA, 2019). La firma espectral obedece a la composición y estructura misma de los objetos. Por ejemplo, la vegetación está asociada a la absorción por la clorofila, el contenido de agua, entre otros. Una superficie blanca

refleja cantidades iguales de radiación de todas las longitudes de onda de luz visible, mientras que una hoja verde refleja menos radiación en las partes roja y azul del espectro en la parte verde. Ello ofrece un exceso de luz verde (en comparación con la azul y la roja), por lo que la hoja parece verde. La composición de la reflexión electromagnética, la firma espectral, nos ofrece información sobre la superficie que emite o refleja la radiación (Romano, 2018).

## **1.6. Percepción Remota para Evaluación de la Cubierta Vegetal**

### **1.6.1 Cambios en la Cobertura del Suelo**

De acuerdo con Jensen (2015), la percepción remota se ha utilizado cada vez más como fuente de información sobre el uso del suelo y la cobertura terrestre a escala local, regional y mundial. La extracción de información temática se realiza a menudo mediante la identificación de patrones espectrales o espaciales en los datos del sensor remoto que están correlacionados con diferentes tipos de uso del suelo o cubierta terrestre presente. El término “reconocimiento de patrón” se utiliza comúnmente para describir este proceso analítico. El reconocimiento de patrones se aplica normalmente a los datos del sensor remoto multiespectral que se ha corregido geométricamente. La clasificación multiespectral se puede realizar utilizando una variedad de métodos:

- Algoritmos basados en estadísticas paramétricas y no paramétricas que utilizan datos a escala de relación e intervalos y métodos no métricos que también pueden incorporar datos de escala nominal.
- Clasificación supervisada o no supervisada.
- Clasificación Hard (crisp) o soft (fuzzy).
- Clasificación por píxel o basada en objetos.
- Clasificación por enfoques híbridos.

Los datos de percepción remota han sido una de las principales fuentes para determinar los cambios espaciales y temporales de la cobertura terrestre. Los cambios en la cobertura de la tierra, en los ecosistemas y los procesos

ambientales a diferentes escalas (local, regional y global) se pueden determinar utilizando las técnicas de uso del suelo y cambios en el uso del suelo (Land Use - Land Cover Change) que permiten la identificación de la extensión, la intensidad y las tasas actuales de estos cambios. El sensor multiespectral ofrece la posibilidad de determinar la detección de cambio digital a través de la repetición de procedimientos que permiten cuantificar las variaciones temporales utilizando imágenes de varias fechas e integrando características que no están incluidas en el espectro visible (Coppin, et al., 2004).

La detección del uso del suelo / cobertura del suelo (Land Use/Land Cover) fue una de las primeras aplicaciones de la percepción remota. Una descripción detallada de los cambios, el estado y la estructura de la vegetación se logra utilizando datos de percepción remota. Sin embargo, debido a que la vegetación es un objetivo heterogéneo con un cierto grado de variación espacial y temporal, se requieren las resoluciones temporales, espaciales y espectrales adecuadas de las imágenes para obtener mapas de uso del suelo / cobertura del suelo (Land Use Land Cover) con suficiente detalle. Estas resoluciones determinarán el monitoreo de la vegetación y el éxito de una aplicación específica de percepción remota en la vegetación. La resolución espacial es la más influyente para los objetivos de vegetación relacionados con los datos de percepción remota. Además, los estudios de vegetación deben considerar las características de resolución temporal, como la fecha de adquisición de la imagen para evitar perturbaciones sobre las imágenes utilizadas y mantener la consistencia de los datos (Wulder et al., 2009).

El uso del suelo / cambio de la cobertura del suelo (Land Use Land Cover Change) es una ciencia en crecimiento, principalmente debido al acceso, al costo relativamente bajo de las imágenes satelitales y los avances en la tecnología informática. Estos factores permiten cuantificar las variaciones temporales utilizando imágenes de varias fechas e integrando sensores multiespectrales.

La medición espacial mediante sensores remotos de la superficie terrestre incluye aspectos temporales de corto, mediano y largo plazo. Un análisis de

procesos a corto plazo puede ser el ciclo de crecimiento de los cultivos para evaluar los rendimientos de una cosecha. Se evalúan las imágenes satelitales tomadas en varias etapas del ciclo de cultivo, incluyendo: preparación del suelo, siembra, establecimiento de plántulas, crecimiento activo, floración, fructificación, maduración de frutas y cosechas. Un análisis de mediano o largo plazo, puede ser la fragmentación del hábitat y el cambio en el uso del suelo, en donde se compara la información de imágenes de satélite en diferentes años. Estas imágenes deben ser capturadas durante la misma época del año para minimizar la expresión de variaciones en factores tales como la calidad de la luz, la geometría de la observación y las diferencias en el comportamiento de una comunidad a lo largo del año, como es el caso de las cubiertas vegetales (Meneses-Tovar, 2011).

### **1.6.2. Métrica del Paisaje**

Los datos y técnicas de percepción remota en combinación con sistemas de información geográfica y métricas del paisaje son fundamentales para analizar y caracterizar la cubierta vegetal y sus cambios. La integración de las técnicas hace posible analizar y clasificar el patrón cambiante de los hábitats durante un largo período de tiempo y, como resultado, comprender los cambios dentro del área de interés (Fichera, Modica & Pollino, 2012).

Las métricas de paisaje se emplean para crear medidas cuantitativas de patrones espaciales comúnmente observados en un mapa, dentro de una imagen de satélite o un conjunto de datos. Al cuantificar los patrones espaciales y modificaciones en el tiempo, nos permite cuantificar los efectos en los procesos ecológicos y así entender los cambios en el hábitat de una especie o comunidad de organismos en particular y determinar si el hábitat se ha vuelto demasiado fragmentado para la especie, o toda una comunidad biológica, persista en una ubicación geográfica particular (Lopez & Frohn, 2018).

Para entender la métrica de los paisajes es necesario diferenciar entre el “Uso de Suelo” y la “Cobertura del Suelo”. El uso de suelo es el término que se utiliza

para describir los usos del hombre sobre la tierra o acciones inmediatas que modifican o convierten la cobertura. Incluye categorías tan amplias como los asentamientos humanos, las áreas protegidas y la agricultura. Dentro de esas amplias categorías se encuentran categorías más refinadas, como los asentamientos urbanos y rurales, los campos de regadío y de secano, los parques nacionales y las reservas forestales, y el transporte y otras infraestructuras. La cobertura del suelo se refiere a los tipos de cubierta vegetativa natural que caracterizan un área en particular. Estos son generalmente un reflejo del clima local y las formas de tierra, aunque ellos también pueden ser alterados por las acciones humanas. Ejemplos de amplias categorías de cobertura de tierras incluyen bosques, tundra, sabana, desierto o estepa, que a su vez pueden subdividirse en categorías más refinadas que representan comunidades vegetales específicas, por ejemplo, matorrales de pino-pino, manglares, pastizales inundados estacionalmente, etc. (Sherbinin, 2002).

NRCan (2015) describe estos dos conceptos:

- La *cobertura del suelo* se refiere a la cubierta superficial, ya sea vegetación, infraestructura urbana, agua, suelo desnudo u otro. Identificar, delinear y mapear la cobertura terrestre es importante para los estudios de monitoreo global, la gestión de recursos y las actividades de planificación. La identificación de la cobertura establece la línea de base a partir de la cual se pueden realizar actividades de monitoreo (detección de cambios) y proporciona la información de la cubierta del suelo para los mapas temáticos de referencia.
- El *uso del suelo* se refiere al propósito que la tierra tiene, por ejemplo, recreación, hábitat de vida silvestre o agricultura. Las aplicaciones de uso del suelo implican tanto el mapeo de línea de base como el monitoreo posterior, ya que se requiere información oportuna para saber qué cantidad actual de tierra está en cada tipo de uso e identificar los cambios de uso de la tierra de un año a otro. El conocimiento ayudará a desarrollar

estrategias para equilibrar la conservación, el efecto de las actividades antropogénicas y el impacto de fenómenos naturales. Entre los temas que impulsan los estudios de uso del suelo es: fragmentación y pérdida de hábitats, perturbaciones a la cubierta vegetal natural, crecimiento de tierras dedicadas a las actividades agropecuarias, desarrollo de centros urbanos y el agotamiento de recursos naturales.

La ecología del paisaje estudia la estructura y dinámicas de cambio a través del tiempo de los hábitats. El paisaje tiene sistemas dinámicos, los cambios se traducen en fragmentación o pérdida de hábitats. Las métricas del paisaje permiten cuantificar los cambios a través del tiempo de la estructura. El desarrollo tecnológico ha dado los medios para evaluar el paisaje en diferentes escalas. Estos desarrollos incluyen: equipo de cómputo que facilita el manejo de grandes volúmenes de datos, disponibilidad de datos obtenidos mediante sensores remotos, imágenes satelitales y sistemas de información geográfica (SIG) para almacenar, manipular y mostrar datos espaciales. El monitoreo y evaluación de los hábitats permitirá decisiones objetivas sobre el medio ambiente (Gökyer, 2013).

### **1.6.3. Índice de Vegetación NDVI**

Existen varias metodologías para estudiar la cobertura vegetal y los cambios estacionales en la vegetación mediante percepción remota. Uno de los métodos es los índices de vegetación bajo la intensidad o cantidad del verde (Chuvienco, 2015).

Rouse (1973) estudio la relación entre los valores de las firmas espectrales y la cobertura vegetal para derivar un índice de vegetación que luego fue conocido como el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI). Los índices de vegetación combinan ecuaciones matemáticas usando diferentes bandas para obtener una medida cuantitativa para mejorar la identificación de la vegetación mientras se minimiza la influencia de la radiación solar y el suelo (Bannari et al., 1995).

El NDVI es una medida del equilibrio entre la energía recibida y la energía emitida por los objetos en la Tierra. Cuando se aplica a las comunidades vegetales, este índice establece un valor para el verde de la zona, es decir, la cantidad de vegetación presente en un área determinada y su estado de salud o vigor de crecimiento (Meneses-Tovar, 2011).

El índice de vegetación NDVI es un parámetro que se obtiene a partir de los valores de reflectancia de las bandas espectrales del rojo (R) y el infrarrojo cercano (NIR) de cualquier sensor satelital, cuyo intervalo de variación, al estar normalizado, queda comprendido entre  $-1$  y  $+1$

$$\text{NDVI} = (\text{NIR} - \text{R} / \text{NIR} + \text{R}).$$

Las áreas con vegetación presentan valores positivos de NDVI, mientras que las nubes, los cuerpos de agua y la nieve tienden a registrar valores negativos. Las rocas y el suelo desnudo presentan valores cercanos a cero. La interpretación de las series de tiempo del NDVI puede ser cualitativa o por medio de la construcción de gráficas que muestran el comportamiento del NDVI a través del tiempo. La evaluación cualitativa se basa en las diferencias de color. Los colores brillantes están asociados a una mayor actividad fotosintética y biomasa foliar (fase de crecimiento y madurez), en tanto que los oscuros están relacionados con una baja actividad fotosintética y menor densidad foliar (fase de senescencia y caída del follaje). Las gráficas del NDVI facilitan el análisis cuantitativo de los cambios fenológicos en valores de NDVI o tiempos, permitiendo obtener varios parámetros: el inicio de la etapa de crecimiento (emergencia de brotes foliares), las tasas de crecimiento y senescencia, los picos de producción máxima y mínima, y la duración de la etapa de crecimiento, entre otros.

La pendiente positiva de la curva, es decir, su fase ascendente, está relacionada con la fase de crecimiento y producción de biomasa, mientras que la pendiente negativa o descendente representa las fases de maduración, senescencia y caída del follaje. El NDVI se ha podido relacionar con las distintas fases fenológicas de la cubierta vegetal. En la época lluviosa el NDVI registra los

valores más altos, entre 0.5 y 0.8, debido al desarrollo y la producción de la biomasa foliar de cada tipo de vegetación; mientras que en el periodo de sequía el NDVI presenta valores bajos, alrededor de 0.2 y 0.3, que representan la senescencia y caída del follaje (Manzo-Delgado, 2009).

La importancia del NDVI como un índice de vegetación reside en que el NDVI puede monitorear los cambios estacionales e interanuales en el crecimiento de la vegetación y su actividad fotosintética, reduciendo los factores de confusión, y además tiene una alta correlación con el Índice de Área Foliar (Leaf Area Index) (Jensen, 2015). El NDVI ha sido usado para determinar cambios en la vegetación (Li et al., 2012), para evaluar la respuesta de la vegetación en diferentes tipos de elevaciones en la estación seca y húmeda (Hermman et al., 2016) y para analizar la distribución de la vegetación ripariana (Mendez-Estrella et al., 2016).

## 2. LITERATURA CITADA

- Aguirre, C. J. (2012). Estado actual de los pastizales del desierto chihuahuense y estrategias para su conservación y uso sustentable. Disertación doctoral. Facultad de Zootecnia y Ecología, Universidad Autónoma de Chihuahua. Chihuahua, México.
- Aguirre, G. R. (2009). Bases físicas de la Percepción Remota. En Aguirre, G. R. (Coord.). Conceptos de Geomática y estudios de caso en México. Instituto de Geografía. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Baldi, G., Guerschman, J. P. & Paruelo, J. M. (2006). Characterization fragmentation in temperate South America grasslands. *Agric. Ecosyst. and Environ.* 116:197-208.
- Bannari, A., Morin, D., Bonn, F., & Huete, A. R. (1995). A review of vegetation indices. *Remote Sensing Reviews*, 13(1-2), 95-120.
- Butler, M. J.A., Mouchot, M.C., Barale, V., & LeBlanc C. (1990). Aplicación de la tecnología de percepción remota a las pesquerías marinas: manual introductorio. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Documento Técnico de Pesca. No. 295. Roma.
- Camara-Sanchez, A. O. (2005). Método contextual para fusión de datos. (Tesis de Maestría, Universidad Nacional Autónoma de México, México, D.F.) Consultado en <http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/437/camarasanchez.pdf?sequence=14>
- CEPAL. (2016). Horizontes 2030: la igualdad en el centro del desarrollo sostenible. Comisión Económica para América Latina y el Caribe. Chile.
- Challenger, A. y Dirzo, R. (2009). Factores de cambio y estado de la biodiversidad, en *Capital natural de México*, Vol. II: Estado de conservación y tendencias de cambio. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. México.
- Chuvieco, S. E. (2015). Teledetección ambiental. La observación de la tierra desde el espacio. (3ra ed.). Editorial Planeta. Barcelona, España.
- CONABIO. (2006). Capital natural y bienestar social. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, México.
- CONABIO. (2009). Capital natural de México, Vol. II: Estado de conservación y tendencias de cambio. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. México.
- Coppin, P., Jonckheere, I., Nackaerts, K., Muys, B., & Lambin, E. (2004). Review Article Digital change detection methods in ecosystem monitoring: a review. *International Journal of Remote Sensing*, 25(9), 1565-1596. doi:10.1080/0143116031000101675

- De León-Mata, G. D., Pinedo-Álvarez, A. y Martínez-Guerrero, J. H. (2014). Aplicación de sensores remotos en el análisis de la fragmentación del paisaje en Cuchillas de la Zarca, México. *Investigaciones Geográficas, Boletín*, núm. 84, Instituto de Geografía, UNAM, México, pp. 42-53, doi: 10.14350/rig.36568.
- ECOTONO. (1996). Fragmentación y metapoblaciones. *Boletín del Programa de Investigación Tropical*. Centro para la Biología de la Conservación.
- Fernandes, A. (S/F). Actividades antropogénicas: origen, características, consecuencias. Consultado en <https://www.lifeder.com/actividades-antropogenicas/>
- Fichera, C. R., Modica, G. & Pollino, M. (2012). Land Cover classification and change-detection análisis using multi-temporal remote sensed imagery and landscape metrics. *European Journal of Remote Sensing*, 45:1, 1-18, DOI: 10.5721/EuJRS20124501
- Gautam, A. (2003). Land use dynamics and landscape change pattern in a mountain watershed in Nepal. *Agric. Ecosyst. and Environ.* 99:83-96.
- Gauthier, D. A., Lafón, A., Toombs, T. P., Hoth, J. & Wiken., E. (2003). Grasslands, toward a North American conservation strategy. Commission for Environmental Cooperation. Canadian Plains Research Center. University of Regina. Saskatchewan, Canada. 99 p.
- Gökyer, E. (2013). Understanding Landscape Structure Using Landscape Metrics. En Ozyavuz, M. (ed.) *Advances in Landscape Architecture*. IntechOpen DOI: 10.5772/51738. Consultado en <https://www.intechopen.com/books/advances-in-landscape-architecture/understanding-landscape-structure-using-landscape-metrics>
- González-Medrano, F. (2012). Las zonas áridas y semiáridas de México y su vegetación. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales - Instituto Nacional de Ecología. México
- Granados-Sánchez, D., López-Ríos G. F. y Gama-Flores, J. L. (1999). Fragmentación del hábitat y manejo de áreas protegidas. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 5(1): 5-14.
- Herrmann, S. M., Didan, K., Barreto-Muñoz, A., & Crimmins, M. A. (2016). Divergent responses of vegetation cover in Southwestern US ecosystems to dry and wet years at different elevations. *Environmental Research Letters*, 11(12), 124005. doi:10.1088/1748-9326/11/12/124005
- INEGI. (2019). Landsat. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. México. Consultado en <https://www.inegi.org.mx/temas/imagenes/imgLANDSAT/>
- Jensen, J. R. (2015). *Introductory digital image processing. A remote sensing perspective*. (4th ed.). Pearson Education. USA

- Jiménez-Sierra, C. L., Sosa-Ramírez J., Cortés-Calva, P., Solís- Cámara, B. A., Íñiguez-Dávalos, L. I. y Ortega-Rubio, A. (2014). México país megadiverso y la relevancia de las áreas naturales protegidas. *Investigación y Ciencia*, 22(60), 16-22.
- Kathleen, A. G., Robin S. R., Roy H. B., Thompson, N. H. (2008). *Fragmentation in Semi-Arid and Arid Landscapes. Consequences for Human and Natural Systems*. Springer. The Netherlands.
- Kemper, J.A., Cowling, R. M., Richardson, D. M., Forsyth, G. G. & McKelly, D. (2000). Landscape fragmentation in South Coast Renosterveld, South Africa, in relation to rainfall and topography. *Austral. Ecol.* 25:179-186.
- Labbate, M., Seymour, J. R., Lauro, F., & Brown, M. V. (2016). Editorial: Anthropogenic Impacts on the Microbial Ecology and Function of Aquatic Environments. *Frontiers in microbiology*, 7, 1044. Consultado en <https://doi.org/10.3389/fmicb.2016.01044>
- Li, Z., & Guo, X. (2012). Detecting Climate Effects on Vegetation in Northern Mixed Prairie Using NOAA AVHRR 1-km Time-Series NDVI Data. *Remote Sensing*, 4(1), 120-134. doi:10.3390/rs4010120
- Lindenmayer, D. B. & Fischer, J. (2006) *Habitat fragmentation and landscape change: an ecological and conservation synthesis*. Island Press, Washington.
- Lopez, R. D. & Frohn, R. C. (2018). *Remote Sensing for Landscape Ecology Monitoring, Modeling, and Assessment of Ecosystems*. (2nd ed.). CRC Press. Boca Raton, FL.
- Manzo-Delgado, L. (2009). Análisis satelital multitemporal de la vegetación. En Aguirre, G. R. (Coord.). *Conceptos de Geomática y estudios de caso en México*. Instituto de Geografía. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Matthew, R., Collin, H., Lauren, C., Meyer, D. K., Bunde, B., Shi, H., Xian, G., Schell, S., and Bobo, M. (2020). Quantifying Western U.S. Rangelands as Fractional Components with Multi-Resolution Remote Sensing and In Situ Data. *Remote Sens.* 2020, 12, 412; doi:10.3390/rs12030412.
- Mendez-Estrella, R., Romo-Leon, J., Castellanos, A., Gandarilla-Aizpuro, F., & Hartfield, K. (2016). Analyzing Landscape Trends on Agriculture, Introduced Exotic Grasslands, and Riparian Ecosystems in Arid Regions of Mexico. *Remote Sensing*, 8(8), 664. doi:10.3390/rs8080664
- Meneses-Tovar, C. L. (2011). NDVI as indicator of degradation. *Unasyuva* 238, Vol. 62 -2.
- NASA. (2015). *Fundamentals of remote sensing*. Consultado en <https://arset.gsfc.nasa.gov/webinars/fundamentals-remote-sensing>

- NASA. (2019). Landsat Overview. National Aeronautics and Space Administration. USA. Consultado en [https://www.nasa.gov/mission\\_pages/landsat/overview/index.html](https://www.nasa.gov/mission_pages/landsat/overview/index.html)
- Navarro-Rodríguez, M. C., González-Guevara, L. F., Flores-Vargas, R. y Amparán-Salido, R. T. (2015). Fragmentación y sus implicaciones. Análisis y reflexión documental. Universidad de Guadalajara. México.
- NRCan. (2015). Fundamentals of Remote Sensing. Canada Centre for Remote Sensing. Natural Resources Canada. Consultado en <https://www.nrcan.gc.ca/maps-tools-publications/satellite-imagery-air-photos/remote-sensing-tutorials/fundamentals-remote-sensing-introduction/9363>
- Peguero-Orta, C. (2012). Sensores remotos y aplicaciones en teledetección geodesia y gestión de recursos naturales y patrimonio natural. Universidad Nacional Abierta y a Distancia, Valle del Cauca, Colombia.
- Pinedo, C., Hernández, N.S., Melgoza, A., Rentería, M., Vélez, C., Morales, C., Santellano, E. y Esparza, E. (2013). Diagnóstico Actual Y Sustentabilidad de los Pastizales del estado de Chihuahua ante el Cambio Climático. Cuerpo Académico de Recursos Naturales y Ecología (UACH-CA16). Facultad de Zootecnia y Ecología, Universidad Autónoma de Chihuahua. Chihuahua, Mex.
- Plue, J. & Cousins, S. A. (2013). Temporal dispersal in fragmented landscapes. *Biol. Conserv.* 160: 250-262.
- Riitters, K. H., Wickham, J. D., O'Neill, R. V., Jones, K. B., Smith, E. R., Coulston, J. W., Wade, T. G. & Smith, J. H. (2002). Fragmentation of continental United States forests. *Ecosystems* 5:815–822.
- Romano, Y. (2018). Elaboración de guías y esquemas simplificados de planeación urbana municipal: Mosaico del territorio mexicano del año 2000 y 2018 a partir de imágenes LandSat. Secretaria de Desarrollo Agrario, Territorial y Urbano – EUROsociAl+
- Rouse, J. W. (1973). Monitoring the vernal advancement and retrogradation of natural vegetation [NASA/GSFCT Type II Report]. Greenbelt, MD: NASA/Goddard Space Flight Center.
- Royo, M., Melgoza, A., Santos, R. J., Carrillo, P., Jurado, R., Gutiérrez y Echavarría, F. (2005). La salud de los pastizales medianos en los estados de Chihuahua y Zacatecas. II Simposio Internacional de Manejo de Pastizales. Memorias. Zacatecas, Zac.
- Santos, T. y Tellería, J. L. (2006). Pérdida y fragmentación del hábitat: efecto sobre la conservación de las especies. *Ecosistemas*, 15(2): 3-12.
- Sarukhán et al. (2017). Capital natural de México. Síntesis: evaluación del conocimiento y tendencias de cambio, perspectivas de sustentabilidad, capacidades humanas e institucionales. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, México.

- SEMARNAT. (2007). ¿Y el medio ambiente? Problemas en México y el mundo. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. México.
- SEMARNAT. (2011). ¿Y el medio ambiente? Biodiversidad Conocer para conservar. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales México.
- SEMARNAT. (2019). Informe de la Situación del Medio Ambiente en México. Compendio de Estadísticas Ambientales. Indicadores Clave, de Desempeño Ambiental y de Crecimiento Verde. Edición Edición 2018. México. Consultado en <https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/informe18/index.html>
- Sherbinin, A. (2002). A CIESIN Thematic Guide to Land-Use and Land-Cover Change (LUCC). Center for International Earth Science Information Network (CIESIN). Columbia University. NY, USA.
- USGS. (2015). Archivos Landsat USGS EROS Archive - Landsat Archives - Landsat 7 ETM+ Level-2 Data Products - Surface Reflectance- Recuperado de [https://www.usgs.gov/centers/eros/science/usgs-eros-archive-landsat-archives-landsat-7-etm-level-2-data-products-surface?qt-science\\_center\\_objects=0#qt-science\\_center\\_objects](https://www.usgs.gov/centers/eros/science/usgs-eros-archive-landsat-archives-landsat-7-etm-level-2-data-products-surface?qt-science_center_objects=0#qt-science_center_objects)
- Valdés, A. (2011). Modelos de paisaje y análisis de fragmentación: de la biogeografía de islas a la aproximación de paisaje continuo. *Ecosistemas*, 20 (2): 11-20.
- Vázquez, Q. G., Pinedo A. A., Manjarrez, C., León, M. G. y Hernández, R. A. (2013). Análisis de la fragmentación de los bosques templados usando sensores remotos de media resolución espacial en Pueblo Nuevo, Durango. *Tecnociencia. Chihuahua* 7:88-98.
- Vega-Vela, V., Muñoz-Robles, C. A., Rodríguez-Luna, E., y López-Acosta, J. C. y Serna-Lagunes, R. (2018). Análisis de la fragmentación del paisaje de la Reserva de la Biosfera Los Tuxtlas, Veracruz, México. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, 5(14):227-238.
- Villegas-Vega, H. (2008). Introducción a la percepción remota y sus aplicaciones geológicas. Instituto Colombiano de Geología y Minería. Colombia.
- Weng, Q. (2014). Introduction to Remote Sensing Systems, Data, and Applications. In Wang, G. & Weng, Q. (Eds.) *Remote Sensing of Natural Resources*. CRC Press. Boca Raton, FL.
- Wulder, M. A., White, J. C., Coops, N. C., & Orllepp, S. (2009). Remote Sensing for Studies of Vegetation Condition: Theory and Application. *The SAGE Handbook of Remote Sensing*, 357-367. doi:10.4135/9780857021052.n25

## CAPÍTULO III. ARTICULO CIENTÍFICO

### RESUMEN

#### INFLUENCIA DE VARIABLES ANTROPOGÉNICAS Y CLIMÁTICAS SOBRE LA FRAGMENTACIÓN DE ECOSISTEMAS SEMIÁRIDOS DEL NORTE DEL ESTADO DE CHIHUAHUA

Las modificaciones del paisaje por actividades humanas son los principales factores que generan pérdida y fragmentación de los ecosistemas. La fragilidad de los ecosistemas de zonas áridas por sequías incrementa su susceptibilidad ante esquemas de uso y manejo de los recursos naturales. Se realizó un estudio en el municipio de Janos, Chihuahua para evaluar la fragmentación, cambio y vigor de la vegetación en el periodo de 1988 a 2019. Se realizaron clasificaciones de uso del suelo en 1988 y 2019 mediante el uso de imágenes de satélite de los sensores Landsat TM 4/5 y Landsat 8 (path/row 34/38 y 34/39). Para la clasificación supervisada se utilizaron sitios de entrenamiento y el algoritmo de Máxima Verosimilitud, adicionalmente, se estimó el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) para ambos años en periodos de sequía y humedad en los meses de mayo y agosto/septiembre, respectivamente. La clasificación supervisada presentó precisiones superiores al 80% en los cuatro mapas de clasificación de uso del suelo desarrollados. Los porcentajes de cambio entre 1988 y 2019 para agosto/septiembre mostraron incrementos en las áreas de vegetación desértica de 50.13%, 18.44% con superficies de nuevo bosque, 5.43% de terrenos con nuevo suelo desnudo, 4.91% de nuevas áreas de agricultura y un 21.09% del área en el municipio de Janos no presento ningún cambio. Para mayo del mismo periodo se tuvo, 1.28% de nuevas áreas agrícolas, 7.27% de superficies con nuevo bosque, 68.82% de áreas que cambiaron a vegetación desértica, 21.98% de nuevo suelo desnudo y 0.66% de la superficie no presento cambio. Los valores de NDVI fueron más altos durante agosto/septiembre comparados con el mes de mayo, ya que la cobertura vegetal y el vigor de la vegetación son mayores durante el periodo húmedo. Los resultados son útiles para promover mejores prácticas de manejo del paisaje en la región.

**Palabras Clase:** Antropogénico, Uso de Suelo, Fragmentación, Percepción Remota, NDVI.

Tesis de Maestría en Ciencias en Recursos Naturales y Medio Ambiente en Zonas Áridas.  
Universidad Autónoma Chapingo  
Autor: Ing. Elena Alejandra López Castro  
Director: Dr. Martín Martínez Salvador

## ABSTRACT

### THE INFLUENCE OF CLIMATE AND ANTHROPOGENIC ACTIVITIES IN THE FRAGMENTATION OF THE SEMIARID ECOSYSTEMS IN THE NORTHERN STATE OF CHIHUAHUA

The landscape modifications by human beings are the most current and important cause of fragmentation and the loss of natural habitats. The vulnerability of the ecosystems in arid zones increases due to the droughts in the area, and the susceptibility of these areas increases as well by the schemes of use and management of natural resources. The study was taken place in Janos, Chihuahua, to evaluate the fragmentation, the change, and the strength of the vegetation from 1988 to 2019. Land use classifications were made for 1988 and 2019 by using satellite images taken from Landsat TM 4/5 and Landsat 8 (path/row 34/38 and 34/39). Training samples and Maximum likelihood were used for the supervised classification. We also incorporated the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) for both years considering May as dry season and the months of August/September as the wet season. The supervised classification had a precision of 80% and higher for the four maps that were made. The change of land use in percentages for the time frame 1988-2019 for August/September was 50.13% of new desert vegetation, 18.44% new forest, 5.43% new bare soil, 4.91% new agriculture, and 21.09% of Janos, Chihuahua did not present changes. In May, for the same period, we had as results that 1.28% was new agriculture, 7.27% new forest, 68.82% new desert vegetation, 21.98% new bare soil, and only 0.66% did not present change. The values for NDVI were higher in August/September than the ones in May. This was due to the land cover and the higher strength the vegetation has due to the availability of water. These results are useful to promote better practices in landscape management in this area.

**Key words:** Anthropogenic, Land Cover, Fragmentation, Remote Sensing, NDVI.

Master Science Thesis, Universidad Autónoma Chapingo

Author: Ing. Elena Alejandra López Castro

Advisor: Dr. Martín Martínez Salvador

## 1. INTRODUCCIÓN

Las acciones antropogénicas han provocado fragmentación de hábitats, pérdida de biodiversidad, contaminación de suelo y aire, así como la reducción de la calidad y disponibilidad del recurso hídrico (SEMARNAT, 2019). La fragmentación del paisaje natural debe ser entendida como la división de un ecosistema continuo en pedazos más pequeños y aislados, cuyo resultado es la reducción del área total de hábitat (pérdida de hábitats), la reducción del tamaño de los parches de hábitat y el aumento en el aislamiento (ECOTONO, 1996).

Los ecosistemas de zonas áridas y semiáridas son de los más extensos a nivel global y se caracterizan por su extrema fragilidad ante eventos naturales y/o antropogénicos (Matthew et al., 2020). En México ocupan más del 50% de la superficie y se estima que albergan unas 6 mil especies vegetales, de las cuales, un poco más del 50% son endémicas. De acuerdo con la CONABIO (2006), la destrucción del hábitat desértica es alta, además se tiene un incremento en la sobreexplotación de la biodiversidad, incremento de especies invasoras y un mayor daño por impacto del cambio climático.

La cobertura vegetal y el uso del suelo en las zonas áridas del estado de Chihuahua ha sido impactada por acciones antropogénicas. El crecimiento de zonas urbanas y su infraestructura de servicios. El sobrepastoreo es un factor de disturbio que afecta los hábitats (Plue & Cousin, 2013). El crecimiento de la agricultura de riego a expensas de los pastizales se ha incrementado (Gauthier et al., 2003). Las sequías severas y recurrentes han impuesto una situación crítica para la vegetación nativa y la productividad de los pastizales (Pinedo et al., 2013). Estos procesos inducen a un estado de fragmentación que exacerba el progresivo estado de deterioro; el 85% de los predios presentan sobrepastoreo, 87.5% tienen problemas de erosión y existe una disminución del 12.8% de la superficie sólo en los pastizales medianos (Royo et al., 2005).

El análisis temporal de un territorio o ecosistema genera información relevante sobre los procesos ecológicos relacionados a la evolución del paisaje (Vázquez et al., 2013). Este conocimiento permite abordar el proceso de fragmentación evaluando sus etapas, los patrones de asentamiento humano y uso de la tierra que los determinan (Gautam, 2003). El monitoreo y evaluación de los hábitats permitirá decisiones objetivas sobre el medio ambiente (Gökyer, 2013).

Los datos y técnicas de percepción remota en combinación con sistemas de información geográfica hacen posible analizar y clasificar el patrón cambiante de los hábitats durante un largo período de tiempo (Fichera, Modica & Pollino, 2012).

El índice de vegetación NDVI es un parámetro que se obtiene a partir de los valores de reflectancia de las bandas espectrales del rojo (R) y el infrarrojo cercano (NIR) de cualquier sensor satelital, cuyo intervalo de variación, al estar normalizado, queda comprendido entre -1 y +1

$$NDVI = (NIR - R / NIR + R).$$

Las áreas con vegetación presentan valores positivos de NDVI, mientras que las nubes, los cuerpos de agua y la nieve tienden a registrar valores negativos. Las rocas y el suelo desnudo presentan valores cercanos a cero.

La actividad humana en la modificación de ecosistemas naturales y la desordenada ocupación del territorio para fines urbanos o de producción agropecuarias ha exacerbado el efecto de los fenómenos naturales, causando desastres con costos sociales y económicos muy elevados (Sarukhán et al., 2017). El evaluar la fragmentación de hábitats, en ecosistemas áridos y semiáridos de la región norte del estado de Chihuahua, por actividades antropogénicas mediante percepción remota y GIS es de vital importancia para mitigar los efectos del hombre y promover un aprovechamiento sustentable de los recursos naturales. Por lo anterior, este proyecto de investigación tiene los siguientes objetivos:

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1. Objetivo General**

Identificar la influencia de factores antropogénicos sobre el cambio de uso del suelo y la fragmentación del ecosistema semiárido ubicado en el municipio de Janos, Chihuahua.

### **2.2. Objetivos Específicos**

- Desarrollar mapas temáticos de cobertura del suelo derivados de imágenes satelitales Landsat 4/5 TM y Landsat 8, a fin de determinar los cambios del uso del suelo.
- Calcular la fragmentación de los ecosistemas ubicados en el municipio de Janos, Chihuahua a partir de los mapas temáticos de cobertura del suelo.
- Realizar un análisis espaciotemporal del ecosistema en el municipio de Janos, Chihuahua, a través del uso de índices de vegetación (NDVI).
- Calcular la correlación entre el índice de vegetación NDVI y variables climáticas como precipitación, temperatura máxima y temperatura mínima.

## **3. HIPÓTESIS**

Las actividades antropogénicas generan cambios de uso del suelo y la fragmentación de los ecosistemas semiáridos del norte de México.

- Los cambios en el uso del suelo pueden ser identificados a través de mapas de clasificación de uso del suelo.
- Las métricas del paisaje presentan una mayor fragmentación en 2019 que en 1988.
- Los valores de NDVI son más altos en la temporada de lluvia (agosto/septiembre) que en la temporada de sequía (mayo).
- Existe una correlación entre el NDVI y las variables climáticas precipitación, temperatura máxima y temperatura mínima.

## 4. MATERIALES Y MÉTODOS

### 4.1. Área de Estudio

El trabajo se llevó a cabo en el municipio de Janos, Chihuahua, ubicado entre los paralelos  $31^{\circ} 21'$  y  $30^{\circ} 09'$  de latitud norte; los meridianos  $107^{\circ}54'$  y  $108^{\circ} 58'$  de longitud oeste, cuenta con rangos de altitud que van desde los 500m a los 2, 200 msnm. La temperatura va desde los  $10^{\circ}$  hasta los  $18^{\circ} \text{C}$ , el mes más caluroso es julio con un promedio de  $26.2^{\circ} \text{C}$ , enero es el más frío con  $7.5^{\circ} \text{C}$  promedio. La precipitación anual va de 200 mm - 700 mm. Janos tiene un 43.71% de pastizales, 26.20% de bosque, 19.76% de matorral, sobre uso de suelo se tiene agricultura con 7.96%, mezquital 0.20% y áreas urbanas con 0.03% (INEGI, 2009).

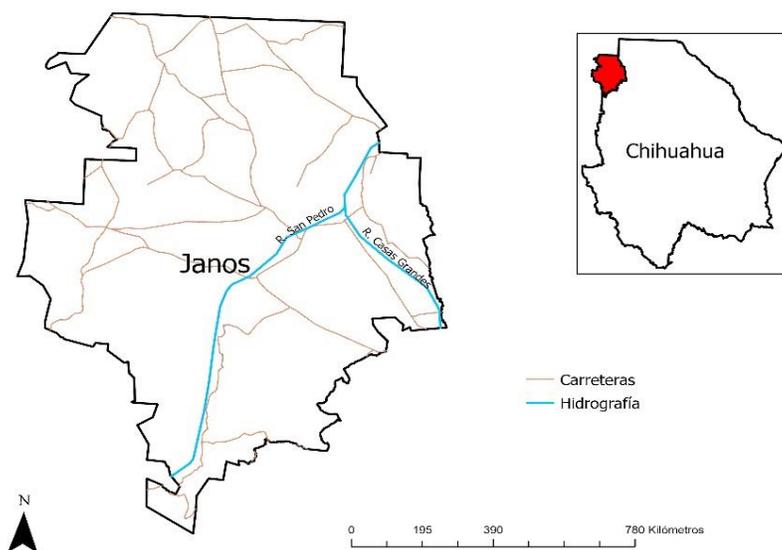


Figura 1. Mapa de ubicación del municipio de Janos, Chihuahua.

### 4.2. Descarga de Imágenes Satelitales

Las imágenes se descargaron del sitio web de USGS a través de la herramienta EarthExplorer. Para descargar las imágenes Landsat en la cuadrícula de WRS-2 se usaron los paths y rows 34/38 y 34/39, para los meses de agosto/septiembre para el periodo húmedo y mayo para el periodo seco, años 1988 y 2019.

Para este estudio fue seleccionado; Landsat, colección 1, nivel dos (en demanda). La razón fue que las imágenes son corregidas de efectos

atmosféricos mediante ESPA (USGS, 2015). Los criterios adicionales incluyeron que las imágenes tuvieran una cobertura de nubosidad menor a 10%.

### 4.3. Análisis NDVI

#### 4.3.1. Cálculo de Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada

Los pasos para el cálculo del NDVI se detallan en la Figura 2.

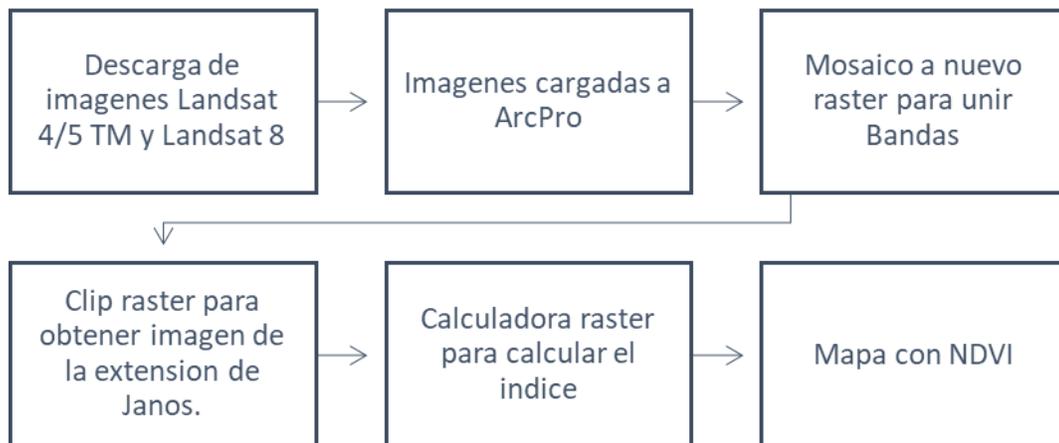


Figura 2. Diagrama de Flujo para el Cálculo de NDVI para Janos, Chih.

El NDVI fue calculado para cada imagen satelital Landsat 4/5 TM y Landsat 8. Se calculó utilizando las bandas espectrales de infrarrojo cercano y bandas espectrales rojas, con la fórmula:

$$NDVI = \frac{Banda\ NIR - Banda\ roja}{Banda\ NIR + Banda\ roja}$$

#### 4.3.2. Comparación de NDVI

Se llevó a cabo la comparación de NDVI para el mes de mayo para 1988 y 2019 (periodo de sequía), y para septiembre 1988 y agosto 2019 (temporada de lluvia), los valores de NDVI fueron clasificados como: NDVI bajo valores menores a 0.2, NDVI medio de 0.2-0.5 y NDVI alto de 0.5 a 1.

### 4.3.3. NDVI y Variables Climatológicas

Se calculó el NDVI de forma mensual para 1988 y 2019, a través de un script en Google Earth Engine (GEE), usando 1157 imágenes del USGS Landsat 5 TM Collection 1 TIER 1 y 630 imágenes del USGS Landsat 8 Collection 1 TIER 1 calibrados a la parte superior de la atmosfera y Landsat 8. Se obtuvieron las variables climáticas precipitación(mm), temperatura máxima, temperatura mínima de las estadísticas climatológicas del estado de Chihuahua (INIFAP,2006) a fin de establecer la correlación entre NDVI y las distintas variables climatológicas. Los valores usados para las variables climáticas correspondieron a los promedios para el periodo 1961-2003.

### 4.4. Análisis de Cobertura de Uso de Suelo

Se realizó un análisis del cambio de cobertura del suelo en el municipio de Janos, entre 1988 y 2019 para los meses de mayo y agosto/septiembre. El sistema de clasificación de la cobertura de suelo se basó en cuatro grupos: agricultura, bosque, vegetación desértica y suelo desnudo. Esto se llevó a cabo por medio de clasificación supervisada. Los pasos se detallan en la Figura 3.

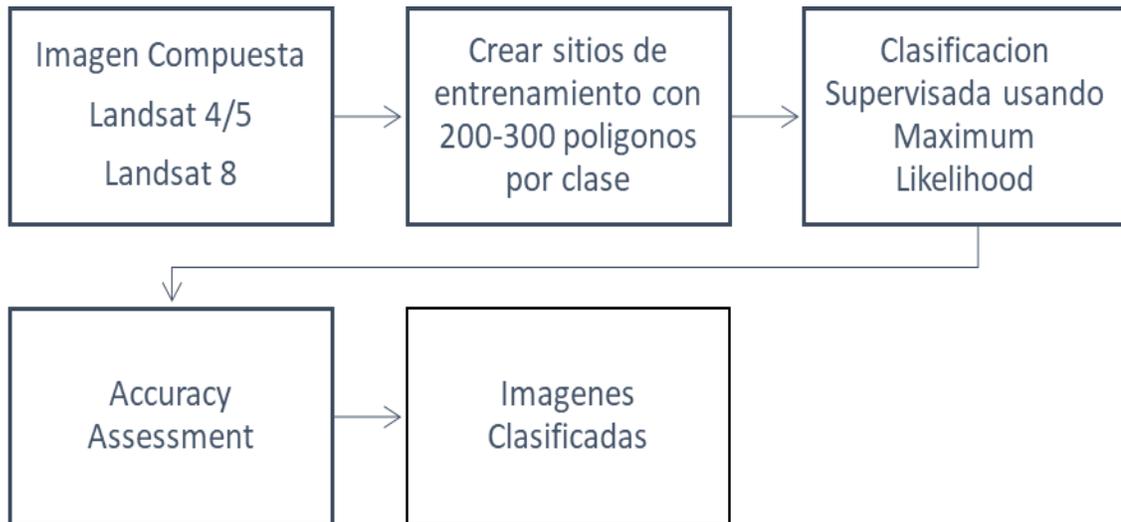
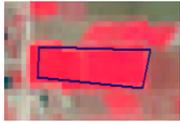
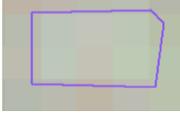
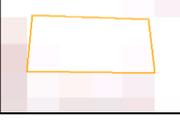


Figura 3. Diagrama de Flujo para obtención de las imágenes clasificadas.

Debido a que durante el proceso se detectó que el área urbana no lograba ser incorporada a la clasificación, se tomó la decisión de no considerarla, ya que solo representa el 0.03% del municipio. Otra razón fue porque la firma espectral se confundía entre las áreas de suelo desnudo y áreas urbanas. En el Cuadro 2 se muestra ejemplos de los pixeles seleccionados para cada clase.

Cuadro 2. Clasificación de la cobertura de suelo con color de los pixeles.

Clasificación	Color de Píxel	Imagen Píxel
Agricultura	Píxeles color desde rojo tenue a rojo fuerte	
Bosque	Píxeles guindas	
Vegetación desértica	Píxeles ligeramente rosa o ligeramente verde.	
Suelo desnudo	Píxeles blancos o píxeles beige	

#### 4.5. Evaluación de Precisión

La evaluación de precisión consiste en la comparación de las imágenes clasificadas con imágenes de referencia, usándose Google Earth. Para el muestreo de los puntos se utilizó el método estratificado, tomándose 100 puntos al azar en cada una de las imágenes clasificadas, con estos puntos se dictamina si el punto estuvo en la clasificación correcta.

#### 4.6. Matrices de Confusión

Las matrices de confusión fueron elaboradas en base a los puntos que fueron creados, para lo cual se elaboró una tabla en Excel para calcular porcentajes de

precisión de la clasificación de cada mapa para Janos, Chihuahua de los meses de mayo y septiembre/agosto, para los años de 1988 y 2019.

#### **4.6.1. Análisis del Paisaje**

Se realizó una descripción de la composición y configuración de la cubierta utilizando las métricas de clase y de paisaje, para analizar los parches que se obtuvieron entre 1988 y 2019, para determinar el porcentaje de fragmentación del área. Lo anterior se llevó a cabo usando un “script” en el programa R. El número de parches es un indicador del grado de fragmentación de un área. Las medidas del paisaje calculadas en R a nivel de parche incluyeron: número de parches, la media del área del parche y el coeficiente de variación del área de parche. Los resultados de las tres medidas del paisaje fueron exportados a Excel, donde se calculó el porcentaje de fragmentación que se ha tenido a lo largo del tiempo en el municipio de Janos, Chihuahua.

## 5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 5.1. Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada

#### 5.1.1. Mapas de NDVI

En las Figuras 4, 5, 6, 7 se muestran los mapas que se realizaron para el análisis del índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) para los meses correspondientes a la investigación. El índice varía entre -1.0 y 1.0, las áreas con valores entre 0.0 y -1.0 corresponden a superficies sin vegetación, el 0.1 puede ser valorado como un área tipo rocosa, arenosa o nevadas, mientras que valores entre 0.2 a 0.3 pueden ser entendidos como un área con escasa vegetación, arbustos o pastizales naturales. Los valores mayores a 0.3 indican que puede existir presencias de pastizales, cultivos, o bosques. El tipo de cobertura, tipo de planta, la estación del año, así como las características de la región influirán en los valores de NDVI.

De los mapas de NDVI podemos inferir que para mayo de 1988 se tienen valores entre 0.0 y -1.0 lo cual indica que hay poca vegetación. En las áreas del sur del municipio de Janos, existen áreas con mayor cubierta vegetal lo cual se aprecia por los valores de NDVI que son mayores a 0.3, (Figura 4).

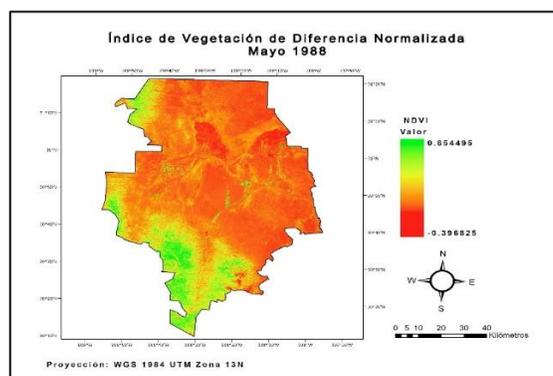


Figura 4. Índice de vegetación de diferencia normalizada mayo de 1988.

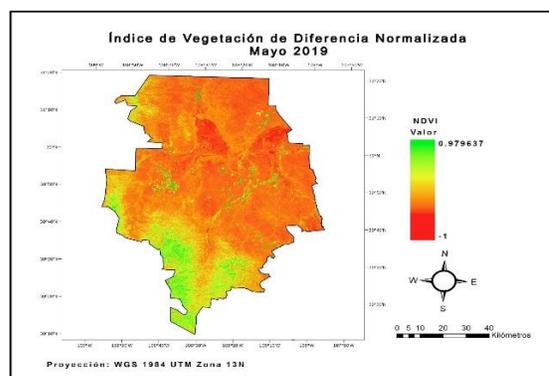


Figura 5. Índice de vegetación de diferencia normalizada mayo de 2019.

Para mayo de 2019 se muestra en la Figura 5, en este es un poco más notorio las superficies en color verde siendo estas áreas de uso agrícola las cuales pueden observarse en la parte central de Janos. En el sur del municipio se muestran áreas con valores superiores 0.3 que denotan mayor presencia de vegetación. También se logra apreciar que en el centro del municipio se tuvo un aumento del NDVI, en comparación con mayo 1988, esto se debe a que el área agrícola se incrementó en el periodo 1988-2019.

Para mayo durante el periodo de 1988-2019 se tuvo poca precipitación ya que corresponde a la época de sequía y por ende los valores de NDVI son bajos. En contraste, en septiembre de 1988 (Figura 6), se aprecian valores de NDVI más altos a lo largo del municipio de Janos, no solamente en algunas regiones. Se aprecia que en el noroeste hay más valores tendientes a interpretarse como superficies con escasa vegetación o bien pastizales naturales. Mientras que en el sur se muestran áreas de bosque que presentan los valores de NDVI más altos. Las áreas agrícolas se siguen identificando, pero en este caso se muestran un poco más en el centro del municipio comparación de mayo de 1988 y septiembre de 1988.

Por último, se obtuvo el NDVI para agosto del 2019 (Figura 7), el mapa de NDVI muestra valores más altos con respecto a mayo y agosto de 1988, así como mayo de 2019. Lo anterior se demuestra por la presencia de mayor superficie en color verde, ya no se observan los colores rojos intensos que se apreciaban en los otros mapas. Es importante destacar que se pueden identificar áreas agrícolas más grandes en el municipio, particularmente en el centro, norte y noroeste. Esto es visible por la forma que tienen las áreas agrícolas, las cuales se pueden distinguir porque tienen formas de superficies rectangulares o circulares. Se puede observar una degradación de la vegetación en el área de bosque en el sur de Janos que presenta valores de NDVI entre 0 y -0.98. En estas áreas se pueden observar varios puntos colores rojos que denotan la ausencia de vegetación en esas áreas.

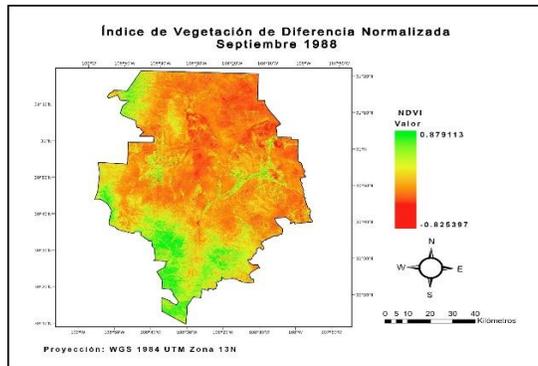


Figura 6. Índice de vegetación de diferencia normalizada septiembre 1988.

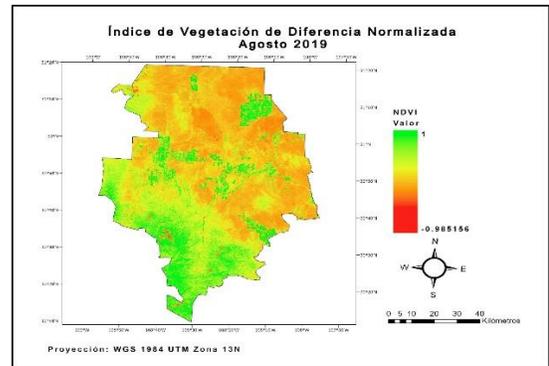


Figura 7. Índice de vegetación de diferencia normalizada agosto 2019.

## 5.2. Diferencias de índices de Vegetación de Diferencia Normalizada

### 5.2.1. Mapas de Diferencias

Las Figuras 8 y 9 muestran los cambios de índice de NDVI. La simbología utilizada para denotar los cambios en NDVI incluye: color rojo que indica cambios negativos, color azul que representa las áreas que se han mantenido iguales en los valores de NDVI y el color verde que muestra las áreas que han tenido un incremento de NDVI.

### 5.2.2. Diferencias Mayo 2019 - Mayo 1988

En la Figura 8 que representa la diferencia de NDVI entre mayo de 1988 y mayo de 2019, se aprecia que hay áreas en el noroeste que tienen un decremento de vegetación notable, esto puede ser debido a que no hubo precipitación en este tiempo lo que hace que la vegetación sea escasa, esto también es visible en el sur y en el oeste del municipio que muestran áreas en rojo. Es importante señalar que el NDVI mostro un ligero decremento entre mayo de 1988 y mayo de 2019 en pequeñas áreas en la parte noreste y sur de Janos. Sin embargo, existe un incremento en el área central y norte del municipio, donde se pueden identificar áreas agrícolas, lo cual se puede interpretar que dichas áreas han experimentado un cambio en el uso del suelo durante el periodo de estudio. Por último, el color

azul muestra que en la mayor parte del municipio para el mes de mayo a través del tiempo no hubo cambio del índice.

### 5.2.3. Diferencias Agosto 2019 - Septiembre 1988

En el mapa elaborado para la diferencia de NDVI entre agosto de 2019 y septiembre de 1988 (Figura 9), se observan una gran cantidad de áreas con incremento de NDVI durante el periodo de estudio para la mayor parte del municipio. Hubo pocas áreas que se mostraron sin cambio, que se pueden identificar en la parte norte y este del municipio. Existen pequeñas áreas sin cambio denotadas en color azul que se muestran alrededor de las áreas que son clasificadas como bosque. Las áreas clasificadas como bosque manifestaron un decremento en el NDVI que se puede observar en color rojo.

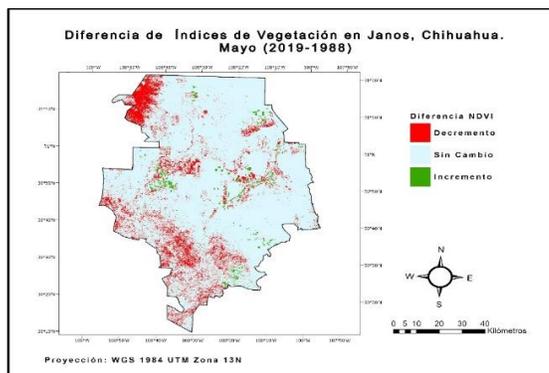


Figura 8. Mapa de Janos, Chih. con diferencia de índices de vegetación normalizada para mayo 1988-2019.

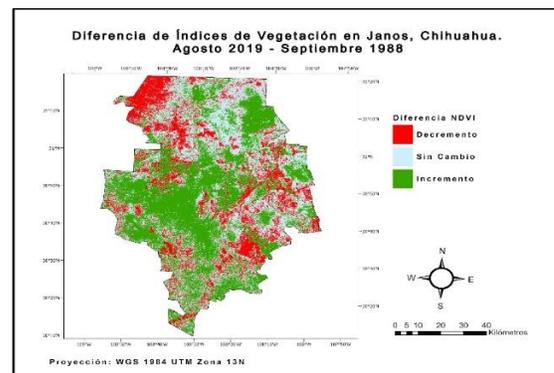


Figura 9. Mapa de Janos, Chih. con diferencia de índices de vegetación normalizada de septiembre 1988 y agosto 2019.

### 5.2.4 Correlación NDVI y Variables Climáticas

Los resultados para comparar las correlaciones entre NDVI y las variables climáticas se muestra en las Figuras 10, 11, 12, 13, 14, 15 para 1988 y 2019.

En las Figuras 10 y 11 se observa la relación entre NDVI y precipitación para 1988 y 2019. Los valores altos de NDVI coinciden con valores altos de precipitación para la temporada de lluvias (julio-septiembre). En contraste, se

aprecian valores bajos de NDVI cuando ocurre baja precipitación (enero-mayo). Este resultado ratifica la eficacia del NDVI para cuantificar vigor de la vegetación.

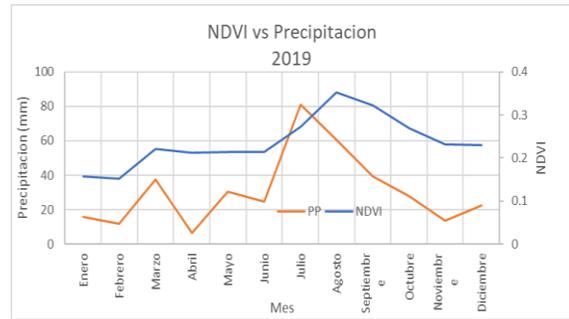
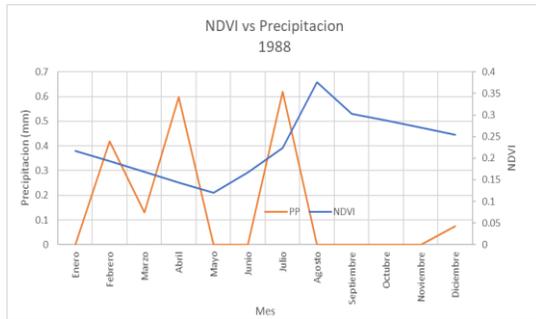


Figura 10. Relación NDVI y precipitación para Janos, Chih. 1988.

Figura 11. Relación NDVI y precipitación para Janos, Chih. 2019.

Las Figuras 12 y 13 muestran la relación entre NDVI y temperatura máxima para 1988 y 2019. Puede observarse que los valores altos de NDVI coinciden con valores altos de temperatura máxima para la temporada de lluvias (julio-septiembre). En contraste, se aprecian valores bajos de NDVI cuando ocurre baja precipitación que coincide con valores más bajos de temperatura máxima (enero-mayo).

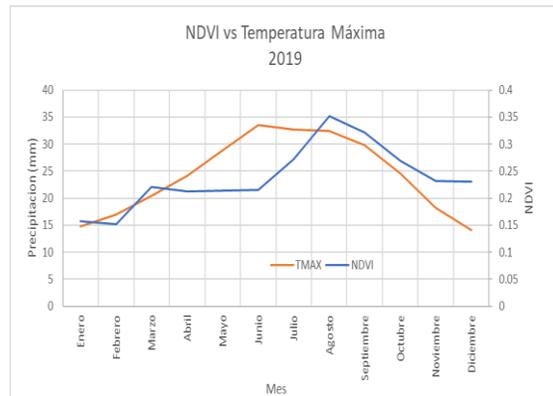
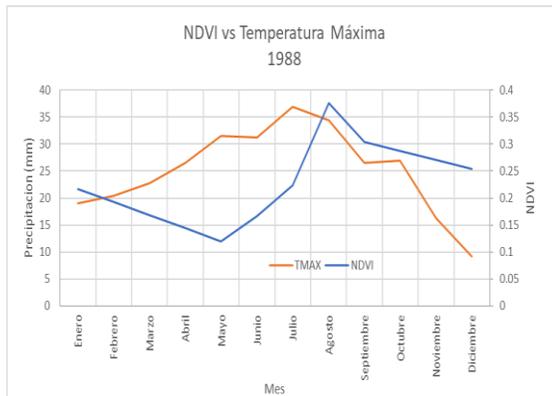


Figura 12. Relación NDVI y temperatura máxima Janos, Chih. 1988.

Figura 13. Relación NDVI y temperatura máxima Janos, Chih. 2019.

Se puede apreciar en las Figuras 14 y 15 que la relación entre NDVI y temperatura mínima para 1988 y 2019 puede distinguirse que los valores altos de NDVI coinciden con valores altos de temperatura mínima para la temporada de lluvias (julio-septiembre). En contraste, se aprecian valores bajos de NDVI cuando se presentan valores bajos de temperatura mínima (enero-mayo).

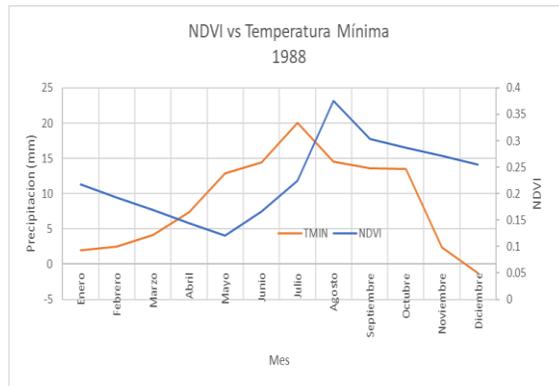


Figura 14. Relación NDVI y temperatura mínima Janos, Chih. 1988.

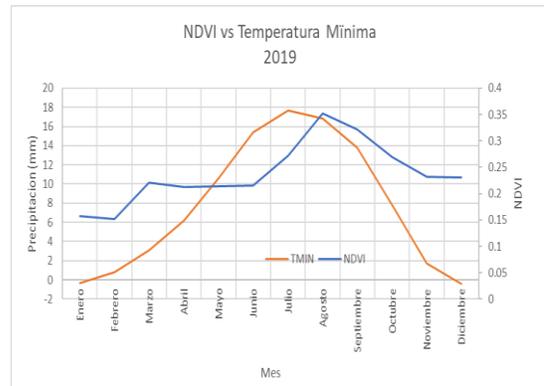


Figura 15. Relación NDVI y temperatura mínima Janos, Chih. 2019.

La relación entre NDVI y las variables climáticas precipitación, temperatura máxima y temperatura mínima, muestra que los valores altos de NDVI coinciden con valores altos de las variables climáticas mencionadas. Lo cual puede deberse a que la mayor disponibilidad de agua y altas temperaturas promueven mayor actividad fotosintética en las plantas, la cual puede ser percibida por los sensores remotos y a través de ella se puede estimar un índice de vegetación NDVI, el cual puede ser comparado en el tiempo para evaluar cambios en la estructura y vigor de los ecosistemas como resultado de variaciones en el clima.

Se calculó la correlación de Pearson en R, para las variables NDVI-precipitación, NDVI-temperatura máxima, y NDVI-temperatura mínima, los resultados se muestran en el Cuadro 3.

Cuadro 3. Correlación de Pearson de Variables Climáticas con NDVI.

Variabes	Año	Correlación de Pearson <i>r</i>
NDVI-Precipitación	1988	-0.35
NDVI-Temperatura Máxima	1988	-0.01
NDVI-Temperatura Mínima	1988	0.14
NDVI-Precipitación	2019	0.67
NDVI-Temperatura Máxima	2019	0.62
NDVI-Temperatura Mínima	2019	0.69

Los valores de correlación entre NDVI y las variables climáticas muestra valores más altos para 2019 que para 1988. Esta diferencia marcada ocurre probablemente debido a que los valores usados para las variables climáticas fueron promedios para el periodo 1961-2003, los cuales tal vez no son representativos de las variables climáticas en 1988. Además, se debe considerar que la precipitación en las zonas áridas es más variable, aun en una misma región ya que no presenta una distribución uniforme.

### 5.3. Clasificación Supervisado de Uso de Suelo

#### 5.3.1. Mapas Clasificación Supervisada de Uso de Suelo

Para poder obtener resultados más concretos sobre el porcentaje de cambio de uso de suelo, se elaboraron 4 mapas de clasificación de uso de suelo del municipio de Janos, se fijaron para las fechas de mayo 1988, septiembre 1988, mayo 2019 y agosto 2019. Los resultados de los mapas clasificados por el método de clasificación supervisada se muestran en las Figuras 16, 17, 18 y 19. La clasificación se basó dentro de 4 categorías, uno que se percibe en color verde oscuro que se le denomina área agrícola, verde claro como bosque, un color amarillo fue designado para la vegetación desértica y por último el color naranja para resaltar las áreas que se presentan como suelo desnudo en el municipio.

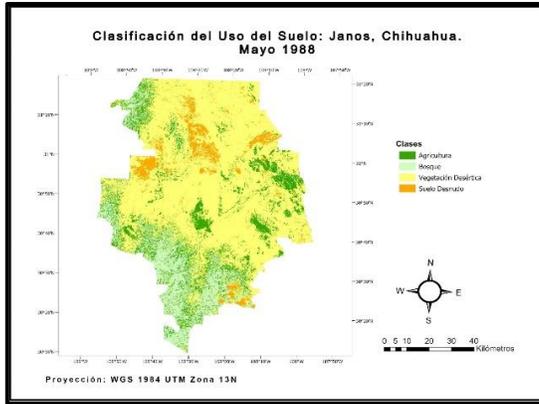


Figura 16. Mapa de clasificación supervisada mayo 1988 de Janos, Chih

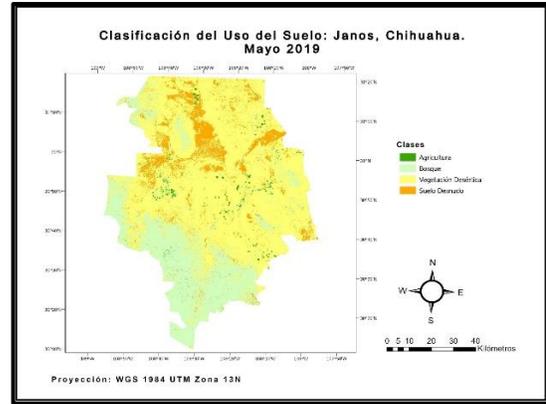


Figura 17. Mapa de clasificación supervisada mayo 2019 de Janos, Chih.

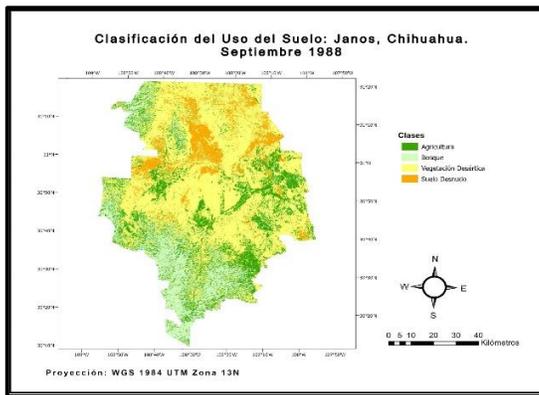


Figura 18. Mapa de clasificación supervisada septiembre 1988 Janos, Chih.

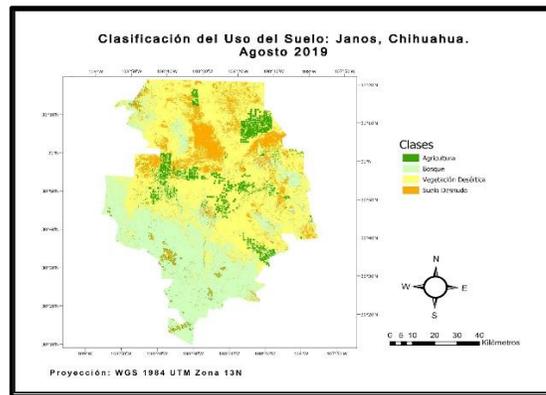


Figura 19. Mapa de clasificación supervisada agosto 2019 Janos, Chih.

### 5.3.2. Matrices de Confusión

A fin de evaluar la precisión de la clasificación supervisada del uso de suelo, se crearon las matrices de confusión que están basadas en los errores de omisión y comisión entre los mapas clasificados y los valores reales. Dichas matrices se presentan en los Cuadros 4, 5, 6, y 7. En la columna total se presentan el número de puntos que fueron identificados en una clase dada de acuerdo con los mapas de clasificación de uso del suelo.

Cuadro 4. Matriz de Confusión para mayo de 1988.

<b>Clasificación Supervisada - Puntos al Azar: mayo 1988</b>						
	<b>Valores de Referencia</b>					
<b>Clases de Suelo</b>	<b>Agricultura</b>	<b>Bosque</b>	<b>Vegetación desértica</b>	<b>Suelo Desnudo</b>	<b>Total</b>	<b>Precisión %</b>
<b>Agricultura</b>	3		2		5	0.60
<b>Bosque</b>	5	13	1		19	0.68
<b>Vegetación desértica</b>	6		61		67	0.91
<b>Suelo Desnudo</b>			1	8	9	0.89
<b>Total</b>	14	13	65	8	100	
<b>% Precisión</b>	0.21	1	0.94	1		
					<b>% General</b>	0.85

Los resultados de precisión para mayo 1988, en las clases consideradas, fueron agricultura 60%, bosque 68%, vegetación desértica 91% y suelo desnudo 89%. Teniendo una precisión general de 85% (Cuadro 4). En septiembre 1988 (Cuadro 5) se obtuvo una precisión de 100% para agricultura, al igual que para la clase de suelo desnudo, mientras que la clase bosque un 73%, y vegetación desértica con un 85% de precisión, teniendo una precisión general de 84%.

Cuadro 5. Matriz de Confusión para septiembre de 1988.

<b>Clasificación Supervisada - Puntos al Azar: septiembre 1988</b>						
	<b>Valores de Referencia</b>					
<b>Clases de Suelo</b>	<b>Agricultura</b>	<b>Bosque</b>	<b>Vegetación desértica</b>	<b>Suelo desnudo</b>	<b>Total</b>	<b>Precisión%</b>
<b>Agricultura</b>	6				6	1
<b>Bosque</b>	6	16			22	0.73
<b>Vegetación desértica</b>	7		55	3	65	0.85
<b>Suelo desnudo</b>				7	7	1
<b>Total</b>	19	16	55	10	100	
<b>% Precisión</b>	0.32	1	1	0.7		
					<b>% General</b>	0.84

El porcentaje de precisión para la clasificación supervisada de agosto 2019 (Cuadro 6) fue de 88% para agricultura, 88% para bosque, 92% para vegetación desértica y un 73 % para suelo desnudo; obteniendo una precisión general del 85%.

Cuadro 6. Matriz de Confusión para agosto de 2019.

<b>Clasificación Supervisada - Puntos al Azar: agosto 2019</b>						
	<b>Valores de Referencia</b>					
<b>Clases de Suelo</b>	<b>Agricultura</b>	<b>Bosque</b>	<b>Vegetación desértica</b>	<b>Suelo desnudo</b>	<b>Total</b>	<b>Precisión %</b>
<b>Agricultura</b>	7	1			8	0.88
<b>Bosque</b>	2	29			33	0.88
<b>Vegetación desértica</b>		2	44	2	48	0.92
<b>Suelo desnudo</b>			3	8	11	0.73
<b>Total</b>	9	32	49	10	100	
<b>% Precisión</b>	0.78	0.91	0.90	0.80		
					<b>% General</b>	0.88

Los resultados para mayo de 2019 fueron un 80% de precisión para agricultura, 90% para bosque, 93% para vegetación desértica y para suelo desnudo un 73%, la precisión general el mes de agosto fue de un 89% (Cuadro 7).

Cuadro 7. Matriz de Confusión para mayo de 2019.

<b>Clasificación Supervisada - Puntos al Azar: mayo 2019</b>						
	<b>Valores de Referencia</b>					
<b>Clases de Suelo</b>	<b>Agricultura</b>	<b>Bosque</b>	<b>Vegetación desértica</b>	<b>Suelo desnudo</b>	<b>Total</b>	<b>Precisión %</b>
<b>Agricultura</b>	8		2		10	0.80
<b>Bosque</b>	2	18			20	0.90
<b>Vegetación desértica</b>		2	55	2	59	0.93
<b>Suelo desnudo</b>			3	8	11	0.73
<b>Total</b>	10	20	60	10	100	
<b>% Precisión</b>	0.80	0.90	0.92	0.80		
					<b>% General</b>	0.89

### 5.3.3. Graficas Porcentaje de Cambio

Con los mapas de clasificación se calculó el número de píxeles en cada clase a fin de realizar una comparación entre 2019 y 1988 para la temporada de sequía (mayo) y para la temporada de lluvias (agosto/septiembre). Con ellos se obtuvo el porcentaje del cambio del uso de suelo, los resultados se muestran en las Figuras 20 y 21.

#### Porcentajes de Cambio entre Mayo 1988 y Mayo 2019

En la Figura 20 se observa que para mayo existe un porcentaje de cambio para la clase agricultura del 1.28%, un cambio de uso del 7.27% en la clase bosque, y los porcentajes de cambio más altos son vegetación desértica con 68.82% y el suelo desnudo con un 21.98%.

#### Porcentajes de Cambio entre Septiembre 1988 y Agosto 2019

La Figura 21, muestra que existieron cambios en todas las clases, agricultura tuvo un 4.91% de cambio en el uso de suelo, suelo desnudo con un 5.43%, mientras que los valores más altos de cambio fueron bosque con un 18.44%, y vegetación desértica con un 50.13%. Por último, se tuvo para este mes un 21.09% del área no presento cambios.

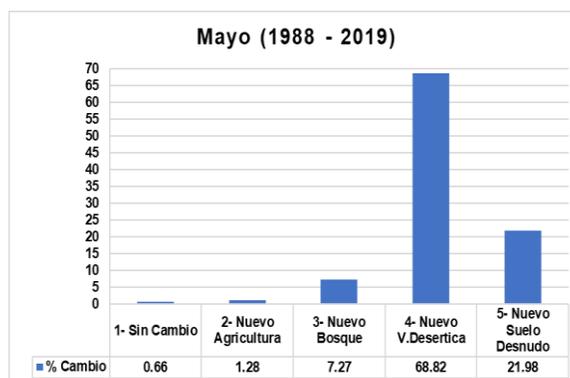


Figura 20. Porcentajes de cambios de uso de suelo en Janos, Chih. mayo de 1988-2019.

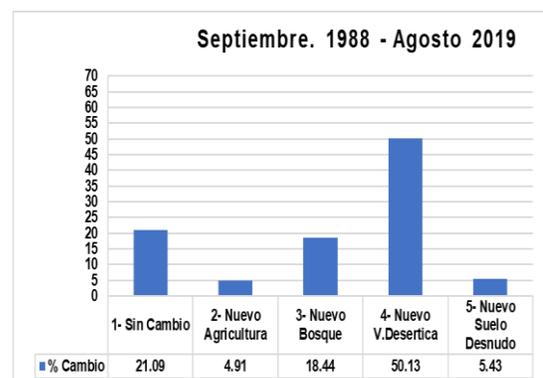


Figura 21. Porcentajes de cambios de uso de suelo en Janos, Chih. en septiembre 1988 y agosto 2019.

#### 5.4. Métricas del Paisaje

En el Cuadro 8, se muestran los coeficientes de variación del tamaño promedio (CVTPP) de parche para cada clase que se determinó en el municipio. Para determinar el porcentaje relativo de cambio se tomó como línea base mayo y septiembre de 1988. El porcentaje de cambio relativo para la temporada de sequía (mayo), muestra que las clases suelo desnudo, vegetación desértica y bosque presentaron un incremento con valores de 23, 26 y 198 % respectivamente. En contraste, la clase agricultura presentó un decremento de 36%. En la temporada de lluvias (agosto/septiembre) se observa un incremento en el CVTPP para las clases agricultura con un 7%, suelo desnudo con un 27%, y bosque con un 546%; mientras que la clase vegetación desértica presentó un decremento de -67% en el CVPTT. Los resultados muestran que hay una mayor fragmentación en algunas clases durante mayo que en septiembre, por ejemplo, la vegetación desértica mostró un CVPTT mayor en mayo que en septiembre, pero esto puede ser atribuido a que en las imágenes de Landsat que se utilizaron para la clasificación es más fácil identificar la vegetación en septiembre que en mayo. Lo anterior debido a la cantidad de lluvia que ocurre en los diferentes meses que se manifiesta en mayor actividad fotosintética que es más fácilmente detectable con las bandas roja y cercano infrarrojo.

Cuadro 8. Valores y porcentaje relativo de cambio de los coeficientes de variación de la media de tamaño de los parches para mayo 1988–2019, septiembre 1988 y agosto 2019.

<b>Coefficiente de Variación del Tamaño Promedio de los Parches</b>						
<b>Clase</b>	<b>Mayo 1988</b>	<b>Mayo 2019</b>	<b>% Relativo de Cambio</b>	<b>Sept. 1988</b>	<b>Agosto 2019</b>	<b>Porcentaje Relativo de Cambio</b>
<b>Agricultura</b>	212.35	135.25	-36%	187.49	200.05	7%
<b>Bosque</b>	241.29	719.71	198%	305.34	1972.46	546%
<b>Vegetación desértica</b>	9736.60	12316.76	26%	4298.69	1399.14	-67%
<b>Suelo desnudo</b>	184.96	227.27	23%	216.43	275.49	27%

El número de parches (NP) es una métrica que describe la fragmentación del paisaje. En el Cuadro 9 se observa que para el porcentaje relativo de cambio tomando como línea base 1988, se presentó un decremento en el NP para ambos meses mayo y septiembre, con lo cual se puede inferir que existe una baja fragmentación del paisaje probablemente debido a que existe una mayor cobertura vegetal, lo cual está acorde con los resultados encontrados para las diferencias en NDVI.

Cuadro 9. Valores y porcentaje relativo de cambio del área de los parches para mayo 1988-2019, septiembre 1988 y agosto 2019.

<b>Número de Parches</b>			
<b>Mes</b>	<b>Número de Parches 1988</b>	<b>Número de Parches 2019</b>	<b>% Cambio Relativo</b>
<b>Mayo</b>	536325	361152	-33%
<b>Septiembre</b>	758336	452403	-40%

Los resultados que se obtuvieron del porcentaje relativo de cambio muestran que la agricultura tuvo un cambio del 19% para mayo entre 1988 y 2019, la clase bosque un 72%, vegetación desértica un -11% y suelo desnudo valores de -18%.

Por último, se obtuvo el porcentaje de cambio entre septiembre 1988 y agosto 2019. Los porcentajes de cambio fueron un 65% para la clase agricultura, 154% para bosque, un -1% para vegetación desértica y suelo desnudo con un 15% de cambio relativo. La clase agricultura presentó incrementos de 19% y 65%, respectivamente, indicando que la superficie agrícola ha venido en aumento en Janos en el periodo de estudio. Otra clase que manifestó incremento en el porcentaje relativo fue bosque con un 72% y 154% para mayo y septiembre respectivamente. En contraste las clases vegetación desértica y suelo desnudo tienen decrementos. La vegetación desértica sufrió decrementos ante los incrementos en el área agrícola.

## 6. CONCLUSIONES

Se confirmó la hipótesis de que los mapas de clasificación de uso del suelo permiten identificar los cambios en el ecosistema. La clasificación supervisada usando el algoritmo de máxima verosimilitud para el municipio de Janos, presentó precisiones superiores al 80% en los cuatro mapas desarrollados.

Los resultados de las métricas del paisaje se contraponen a la hipótesis de que hay una mayor fragmentación en 2019 que en 1988. Lo anterior debido a que la precisión en los mapas de clasificación de algunas clases como agricultura está por abajo de 80%, lo cual afecta el cálculo de las métricas del paisaje.

Los cambios en tamaño de parche para la temporada de sequía se dieron incrementos del 23, 26 y 198% de suelo desnudo, vegetación desértica y bosque, y agricultura con un decremento del 36%, tomando como base 1988.

Para las temporadas de lluvia se tuvo un incremento del 7% para agricultura, 27% para suelo desnudo, bosque 546% (probable confusión de color y vigor entre usos de suelo), mientras que la vegetación desértica tubo un decremento del 67%. En cuanto al número de parches (NP), se tuvo una reducción del número parches, mostrando que el municipio ha tenido un aumento de cobertura vegetal.

Se confirmó la hipótesis, de que los valores de NDVI fueron más altos durante agosto/septiembre que en mayo. Debido principalmente a que la cobertura vegetal es mayor durante el periodo de lluvias (agosto/septiembre) con lo cual hay una mayor disponibilidad de agua para las plantas y por lo tanto una mayor actividad fotosintética que puede ser detectada por las bandas roja e infrarroja que son las bandas utilizadas para el cálculo del NDVI.

Las diferencias de NDVI obtenidas para mayo 1988 y mayo 2019 mostraron que áreas en el noroeste, sur y oeste tuvieron decremento de vegetación, esto pudo ser debido a la ausencia de precipitación. Las áreas que mostraron incremento de NDVI fueron áreas agrícolas localizadas en el centro y norte de Janos. En la mayor parte del municipio no existió cambio de 1988-2019. En cuanto a las

diferencias del índice para la temporada de precipitaciones más altas, se apreciaron incrementos considerados del índice, existió decremento de índice en áreas consideradas como bosque alrededor del municipio, y fueron pocas las áreas que no mostraron cambios en Janos.

Existe una correlación positiva entre NDVI y las variables climáticas. A mayor precipitación mayor disponibilidad de agua que en conjunción con altas temperaturas promueven mayor actividad fotosintética en las plantas. Este fenómeno es captado a través del índice de vegetación NDVI que usa las bandas rojas e infrarroja del espectro electromagnético.

Los resultados que se obtuvieron serán de gran importancia para estudios a futuro para el entendimiento de la fragmentación que ocurre en diferentes áreas. Por medio del método empleado en este trabajo se pueden lograr elaborar planes de manejo de los recursos naturales para mitigar el impacto que se tiene por actividades antropogénicas en los hábitats naturales.

En futuros estudios sobre cambios de uso de suelo en zonas áridas y semiáridas se recomienda usar otros algoritmos de clasificación, como árboles de clasificación y regresión (CART). Lo anterior a fin de incrementar la precisión de algunas clases que afectan los resultados de métricas del paisaje. Además, es necesario incluir años intermedios, por ejemplo, cada 5 años, ya que el presente estudio consideró un intervalo de 30 años.

Sera fundamental el contar con bases de datos climáticas completas y actualizadas a fin de establecer con mayor certidumbre la correlación entre índices de vegetación como el NDVI con variables climáticas.

## 7. LITERATURA CITADA

- CONABIO. (2006). Capital natural y bienestar social. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, México.
- ECOTONO. (1996). Fragmentación y metapoblaciones. Boletín del Programa de Investigación Tropical. Centro para la Biología de la Conservación.
- Fichera, C. R., Modica, G. & Pollino, M. (2012). Land Cover classification and change-detection análisis using multi-temporal remote sensed imagery and landscape metrics. *European Journal of Remote Sensing*, 45:1, 1-18, DOI: 10.5721/EuJRS20124501
- Gautam, A. (2003). Land use dynamics and landscape change pattern in a mountain watershed in Nepal. *Agric. Ecosyst. and Environ.* 99:83-96.
- Gauthier, D. A., Lafón, A., Toombs, T. P., Hoth, J. & Wiken., E. (2003). Grasslands, toward a North American conservation strategy. Commission for Environmental Cooperation. Canadian Plains Research Center. University of Regina. Saskatchewan, Canada. 99 p.
- Gökyer, E. (2013). Understanding Landscape Structure Using Landscape Metrics. En Ozyavuz, M. (ed.) *Advances in Landscape Architecture*. IntechOpen DOI: 10.5772/51738. Consultado en <https://www.intechopen.com/books/advances-in-landscape-architecture/understanding-landscape-structure-using-landscape-metrics>
- INEGI. (2009). Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos. Janos, Chihuahua - Clave geoestadística 08035. Consultado en [http://www3.inegi.org.mx/contenidos/app/mexicocifras/datos\\_geograficos/08/08035.pdf](http://www3.inegi.org.mx/contenidos/app/mexicocifras/datos_geograficos/08/08035.pdf)
- INIFAP. (2006, September 8). Estadísticas Climatológicas Básicas del Estado de Chihuahua. Consultado en <http://biblioteca.inifap.gob.mx:8080/jspui/bitstream/handle/123456789/3409/Estadisticas%20climatologicas%20basicas%20para%20el%20estado%20de%20Chihuahua.pdf?sequence=1#page=126&zoom=100,0,0>
- Matthew, R., Collin, H., Lauren, C., Meyer, D. K., Bunde, B., Shi, H., Xian, G., Schell, S., and Bobo, M. (2020). Quantifying Western U.S. Rangelands as Fractional Components with Multi-Resolution Remote Sensing and In Situ Data. *Remote Sens.* 2020, 12, 412; doi:10.3390/rs12030412.
- Pinedo, C., Hernández, N.S., Melgoza, A., Rentería, M., Vélez, C., Morales, C., Santellano, E. y Esparza, E. (2013). Diagnóstico Actual Y Sustentabilidad de los Pastizales del estado de Chihuahua ante el Cambio Climático. Cuerpo Académico de Recursos Naturales y

Ecología (UACH-CA16). Facultad de Zootecnia y Ecología, Universidad Autónoma de Chihuahua. Chihuahua, Mex.

- Plue, J. & Cousins, S. A. (2013). Temporal dispersal in fragmented landscapes. *Biol. Conserv.* 160: 250-262.
- Royo, M., Melgoza, A., Santos, R. J., Carrillo, P., Jurado, R., Gutiérrez y Echavarría, F. (2005). La salud de los pastizales medianos en los estados de Chihuahua y Zacatecas. II Simposio Internacional de Manejo de Pastizales. Memorias. Zacatecas, Zac.
- Sarukhán et al. (2017). Capital natural de México. Síntesis: evaluación del conocimiento y tendencias de cambio, perspectivas de sustentabilidad, capacidades humanas e institucionales. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, México.
- SEMARNAT. (2019). Informe de la Situación del Medio Ambiente en México. Compendio de Estadísticas Ambientales. Indicadores Clave, de Desempeño Ambiental y de Crecimiento Verde. Edición Edición 2018. México. Consultado en <https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/informe18/index.html>
- USGS. (2015). Archivos Landsat USGS EROS Archive - Landsat Archives - Landsat 7 ETM+ Level-2 Data Products - Surface Reflectance- Recuperado de [https://www.usgs.gov/centers/eros/science/usgs-eros-archive-landsat-archives-landsat-7-etm-level-2-data-products-surface?qt-science\\_center\\_objects=0#qt-science\\_center\\_objects](https://www.usgs.gov/centers/eros/science/usgs-eros-archive-landsat-archives-landsat-7-etm-level-2-data-products-surface?qt-science_center_objects=0#qt-science_center_objects)
- Wulder, M. A., White, J. C., Coops, N. C., & Orllepp, S. (2009). Remote Sensing for Studies of Vegetation Condition: Theory and Application. *The SAGE Handbook of Remote Sensing*, 357-367. doi:10.4135/9780857021052.n25