



Universidad Autónoma de Querétaro
Facultad de Ciencias Naturales
Licenciatura en Biología

Tendencia del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada para una zona del centro de México

TESIS

Que como parte de los requisitos para obtener el grado de

Licenciado en Biología

Presenta:

Paula Livia López Cuellar

Dirigido por:

Dr. Aurelio Guevara Escobar

SINODALES

Dr. Aurelio Guevara Escobar
Director

Firma

Dr. Enrique González Soza
Asesor

Firma

Mtro. Hugo Luna Soria
Asesor

Firma

Dr. Humberto Suzán Azpiri
Asesor

Firma

Dr. Oscar García Rubio
Asesor

Firma

Dr. Germinal Jorge Cantó Alarcón
Director de la Facultad

Dr. Humberto Suzán Azpiri
Director de Investigación y
Posgrado

Centro Universitario
Querétaro, Qro.
2012

RESUMEN

El aumento de la población y el incremento de las actividades antropogénicas, así como el cambio en las condiciones climáticas, han conducido a modificaciones importantes en la cubierta vegetal en el país. Las zonas de vegetación árida y semiárida son particularmente sensibles a estos cambios. Monitorear el estado de la cubierta vegetal en estas zonas e identificar su tendencia es importante para la planeación estrategias para su manejo y conservación. En este trabajo se estudian los cambios en el estado de la vegetación (verdor) en una región del centro del país para las últimas dos décadas mediante el análisis de una serie temporal del índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) de imágenes Landsat TM. Los cambios que ocurren en esta zona se deben en gran medida al crecimiento de la frontera agrícola. Los resultados obtenidos muestran tendencias positivas del NDVI en la mayor parte de la superficie; sin embargo, las pendientes negativas fueron mayores, es decir, los cambios negativo fueron más pronunciados. En cuanto a las diferentes coberturas vegetales, la vegetación de climas secos y subhúmedos presentó calores de tendencia negativos mayores que la vegetación de climas templados. La selva bajas caducifolia y subcaducifola obtuvieron los mayores valores de pendiente negativos, seguida por matorrales xerófilos. En cuanto a la región agrícola, las zonas de agricultura de temporal presentaron un incremento ligero en la tendencia temporal, mientras que las tendencias en la zona de riego fueron más variadas. La resolución de la imágenes Landsat resultó adecuada para la diferenciación de las coberturas vegetales en la zona de estudio. Este trabajo proporciona una base para el análisis de los factores que influyen en los cambios de la cobertura vegetal en la zona centro del país, y una herramienta para la predicción de cambios en la vegetación y la localización de fenómenos como la desertificación y la erosión.

Palabras clave: NDVI, análisis de series temporales, Δ NDVI

SUMMARY

Increasing human population and anthropogenic activities, along with changes of climatic conditions, have led to significant modifications on vegetation cover in México. Arid and semi-arid vegetation are more sensitive to those changes. Monitoring the state of vegetation cover and identifying temporal trends is important for defining strategies for the conservation and management of these areas. This study analyses the changes on vegetation coverage greenness for the last two decades on a central area of the country using a temporal series of Landsat TM for the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI). Changes occurring on this area are mainly the result of agricultural land expansion. Results obtained on this study show positive NDVI trends on most part of the area. However, negative slopes are steeper, indicating more intense negative changes. Discriminating between vegetation cover types, vegetation of dry and sub-humid lands showed greater negative trend values compared to the vegetation of temperate lands. Tropical deciduous and semi-deciduous forest presented the greater negative slope values, followed by xeric shrublands. For the agricultural lands, rainfed agriculture lands presented a little increase on the temporal trends, whereas irrigation agriculture lands obtained more varied trends. The resolution of Landsat TM images turned out to be suitable for the discrimination between different cover types on this study area. The present study provides a base for the analysis of biological and climatic factors that influence changes on the vegetal cover in this central area of the country, for predicting changes in vegetation and identifying areas where desertification or erosion may occur.

Key words: NDVI, Temporal series analysis, greenness, Δ NDVI

AGRADECIMIENTOS

A los fondos sectoriales CONACYT- SEMARNAT para la realización del proyecto “Índices de desertificación de base Física y/o biofísica” del que es parte este trabajo.

Al Dr. Aurelio Guevara por dirigir este trabajo, por la oportunidad de trabajar en este proyecto y por el conocimiento que me ha compartido durante la realización de esta tesis.

Al Dr. Enrique González Soza, el Dr. Humberto Suzán Azpiri, el Dr. Oscar García Rubio por el tiempo dedicado a la revisión de este trabajo, por sus sugerencias y observaciones. Especialmente quiero agradecer al Mtro. Hugo Luna Soria por el tiempo y los conocimientos compartidos, gracias a los cuales he podido realizar este trabajo.

A mi Familia. Gracias por el apoyo incondicional durante el transcurso de la carrera y en general en mi vida. Su cariño y apoyo me han sostenido en cada decisión y me ha formado la persona que soy. Gracias por respetar siempre mis elecciones. A mis mejores amigos por creer en mí e impulsarme a seguir adelante. Agradezco su apoyo, cariño y su comprensión.

ÍNDICE

| | Página |
|---|--------|
| Resumen | i |
| Summary | ii |
| Agradecimiento | iii |
| Índice | iv |
| Índice de Figuras | v |
| Índice de Cuadros | vi |
| I. INTRODUCCION | 1 |
| II. ANTECEDENTES | 4 |
| Fundamentos de la teledetección | 4 |
| Índices de Vegetación | 6 |
| El Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) | 7 |
| III. METODOLOGIA | 10 |
| Descripción del área de estudio | 10 |
| Procesamiento de las imágenes satelitales | 14 |
| Cálculo del NDVI | 16 |
| Regresión lineal y análisis de tendencias del Δ NDVI | 17 |
| IV. RESULTADOS Y DISCUSION | 18 |
| Cálculo del NDVI | 18 |
| Regresión lineal y análisis de tendencias del Δ NDVI | |
| V. CONCLUSIONES | |
| LITERATURA CITADA | |
| APÉNDICE | |

ÍNDICE DE CUADROS

| Cuadro | | Página |
|--------|--|--------|
| 3.1 | Longitudes de onda para las bandas en el sensor Thematic Mapper (TM) | 14 |
| 4.1 | Estadísticas del NDVI de las imágenes de 2006 a 2009 | 19 |
| 4.2 | Tendencia del NDVI para los diferentes tipos de vegetación y uso de suelo. | 30 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| Figura | Página |
|---|---------------|
| 2.1 Longitudes de onda del espectro electromagnético | 5 |
| 2.2 Comportamiento espectral de la vegetación | 7 |
| 2.3 Respuesta espectral de la vegetación sana | 8 |
| 2.4 Radiación fotosintéticamente activa y fotosíntesis | 9 |
| 3.1 Área de estudio | 10 |
| 3.2 Mapa de Provincias Biogeográficas incluidas en el área de estudio | 11 |
| 3.3 Clasificación climática de la zona de estudio, en base a las modificaciones de clima y vegetación de García y Rzedowski para la clasificación de Köppen | 12 |
| 3.4 Vegetación y uso de suelo. Inventario Nacional Forestal | 13 |
| 3.5 Escenas que comprenden la zona de estudio (Landsat TM) | 15 |
| 4.1 Cálculo del NDVI para el año 1993 | 19 |
| 4.2 Cálculo del NDVI para el año 1994 | 20 |
| 4.3 Cálculo del NDVI para el año 1997 | 21 |

| | | |
|------|--|----|
| 4.4 | Cálculo del NDVI para el año 1999 | 22 |
| 4.5 | Cálculo del NDVI para el año 2000 | 23 |
| 4.6 | Cálculo del NDVI para el año 2009 | 24 |
| 4.7 | Cálculo de la tendencia del NDVI por medio del estimador no paramétrico Theil-Sen. | 25 |
| 4.8 | Valores de tendencia de cambio del NDVI clasificados por el método de Jenks (quebres naturales) | 26 |
| 4.9 | Áreas que permanecen sin vegetación a lo largo del periodo de estudio | 27 |
| 4.10 | Distribución de las zonas con incremento positivo ($NDVI > 0$) y negativo ($NDVI < 0$) de verdor de la vegetación. | 28 |
| 4.11 | Tendencia del NDVI en una zona agrícola al oeste del estado de Guanajuato | 29 |
| 4.12 | Manejo en las zonas agrícolas | 30 |
| 4.13 | Distribución de la zona agrícola y áreas de vegetación natural | 31 |
| 4.14 | Distribución y $\Delta NDVI$ para la vegetación de bosque | 32 |
| 4.15 | Distribución y $\Delta NDVI$ para la vegetación de selva caducifolia y subcaducifolias | 33 |
| 4.16 | Distribución y $\Delta NDVI$ para la vegetación de matorral | 34 |
| 4.17 | Distribución y $\Delta NDVI$ para la vegetación de pastizal natural | 35 |

I. INTRODUCCIÓN

Existen ciertas características fenológicas que nos permiten identificar en qué condiciones se encuentra una cobertura vegetal. Una de estas es el verdor de la vegetación, el cual es un indicativo de la actividad fotosintética y la salud e integridad de una cubierta vegetal (Liang *et al.* 2005). Para medir el comportamiento fenológico de las coberturas vegetales se han desarrollado diversos índices de vegetación basados en la respuesta espectral de la vegetación con datos obtenidos por medio de sensores remotos. Estos sensores recogen información sobre la radiación que refleja la superficie terrestre y la almacenan en diferentes bandas de acuerdo su la longitud de onda. En conjunto, estas bandas proporcionan imágenes o matrices de datos en los que cada píxel contiene información de la reflectancia para una zona específica de la superficie. La precisión de estas imágenes para el estudio de la superficie terrestre depende de la resolución del sensor y también del uso y la escala que se requiera manejar.

Uno de los índices más usados para estudios de monitoreo de la vegetación es el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), con el cual se puede obtener una clasificación de las diferentes coberturas de una zona y permite diferenciar la vegetación vigorosa o activa de la vegetación senescente o enferma, mediante el contraste de la cantidad de luz visible (60 μm - 70 μm) e infrarroja (70 μm - 90 μm) que es reflejada por la vegetación verde. El NDVI ha sido ampliamente utilizado para la identificación de zonas prioritarias para conservación, problemas como erosión o desertificación, presencia de plagas y monitoreo de zonas agrícolas.

Es importante monitorear los cambios que ocurren en la cubierta vegetal ya que son indicadores importantes de la salud del ecosistema. Estos cambios son inducidos por las variaciones climáticas y el incremento de la actividad humana. Para monitorear estos cambios se realizan análisis de series

temporales de imágenes satelitales con la finalidad de obtener tendencias de cambio de los valores de los índices de vegetación. Estudiar las tendencias temporales de la vegetación proporciona herramientas para la identificación de áreas con riesgo de erosión y pérdida de la productividad del suelo. En la actualidad se dispone de un amplio acervo de información satelital. Los archivos históricos más antiguos como el de Landsat cuentan con información de casi tres décadas, lo que permite crear modelos más precisos sobre los cambios ocurridos en la superficie terrestre.

El presente trabajo forma parte del proyecto de investigación “Índices de desertificación de base física y/o biofísica”, financiado por fondos sectoriales CONACYT-SEMARNAT.

El objetivo del trabajo es obtener un modelo del cambio ocurrido en el estado de la cubierta vegetal de una zona del centro del México durante las últimas dos décadas por medio del análisis de una serie temporal de imágenes satelitales del NDVI. Para lo cual se pretende a) obtener una base de datos de imágenes satelitales de las últimas dos décadas para el área de estudio b) obtener los valores de NDVI para cada una de las imágenes que conforman la serie temporal c) obtener las tendencias del cambio del NDVI durante el periodo por medio de una regresión lineal d) identificar las tendencias generales y para cada tipo de cobertura vegetal de la zona.

El área de estudio abarca principalmente una parte del Altiplano Sur, y esta dominada por ecosistemas áridos y semiáridos. En las últimas décadas se han presentado diversos cambios en la vegetación de la zona central de México. Diversos fenómenos como el crecimiento demográfico, la sobreexplotación de recursos y el cambio climático han provocado modificaciones en la estructura de sus paisajes (Butzer, 1997). La vegetación de zonas áridas y semiáridas, es particularmente susceptible a los cambios en las condiciones climáticas (Madrigal-Gómez y López-Caloca, 2010).

La degradación de tierras en zonas áridas, semiáridas y subhúmedas-secas tiene como consecuencia problemas como la desertificación, erosión y la pérdida de la productividad del suelo (Chapela, 2004). Entre los factores que pueden ocasionar la degradación de los suelos se encuentran el desplazamiento de los materiales de los suelos debido a la erosión del viento y el agua, el empobrecimiento interno de los suelos ocasionado por procesos físicos y químicos, y la pérdida de la vegetación natural (Oropeza, 2004). Debido a la fragilidad de estos ecosistemas es importante generar información sobre las condiciones de la vegetación y las variables que influyen en su desarrollo.

II. ANTECEDENTES

Fundamentos de la teledetección

La teledetección se define como el uso de sensores remotos con la finalidad de observar, medir y registrar la radiación electromagnética reflejada o emitida por la superficie terrestre, y su posterior análisis y extracción de información (Levin, 1999). La materia, dependiendo de su volumen y superficie, puede interactuar y producir cambios en la radiación electromagnética incidente, tales como cambios en la magnitud, dirección, longitudes de onda y polarización, entre otros. Dichos cambios pueden ser detectados y registrados por medio de imágenes creadas por sensores remotos. La interpretación de estas imágenes permite identificar las características de la materia que producen tales cambios en la radiación incidente.

La radiación solar que llega a la tierra puede ser 1) transmitida, es decir que pasa a través de la sustancia a otra, 2) absorbida por una sustancia, contribuyendo en gran parte a su calentamiento, 3) dispersada, es decir, desviada en varias direcciones, 4) reflejada, si la energía es devuelta sin sufrir modificaciones desde la superficie de la sustancia, ya sea en un ángulo igual y opuesto al ángulo de incidencia, o reflejada de igual manera en todas las direcciones. Las interacciones que pueda tener la materia con la radiación electromagnética se producen en función de las propiedades de su superficie y su estructura molecular y atómica (Levin, 1999).

Los sensores satelitales registran estas diferencias en el comportamiento de la radiación en interacción con la superficie terrestre y la almacenan en forma de retículas o píxeles que contienen información de la respuesta espectral de un punto en la superficie terrestre, dividida en bandas que dividen por rangos las longitudes de onda del espectro electromagnético (Figura 2.1). Algunos ejemplos de estos sensores son el Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR)

de los satélites NOAA, el Thematic Mapper de Lansat, y Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) de los satélites Terra y Aqua. La información que genera estos sensores proporciona una mayor cantidad de observaciones sobre la cobertura del suelo, en comparación con los levantamientos terrestres, y además permiten la detección de características de la vegetación que sólo se manifiestan en regiones del espectro electromagnético y no son detectables a simple vista. Las imágenes satelitales han resultado de gran utilidad para el monitoreo de cambios de origen antropogénico y naturales a través de diferentes periodos de tiempo. Algunos de los cambios que permiten identificar son el desarrollo agrícola, la deforestación, urbanización, desastres naturales, y la reducción o crecimiento de cuerpos de agua (Alatorre y Beguería, 2010; Alcaraz-Segura, *et al.* 2008)

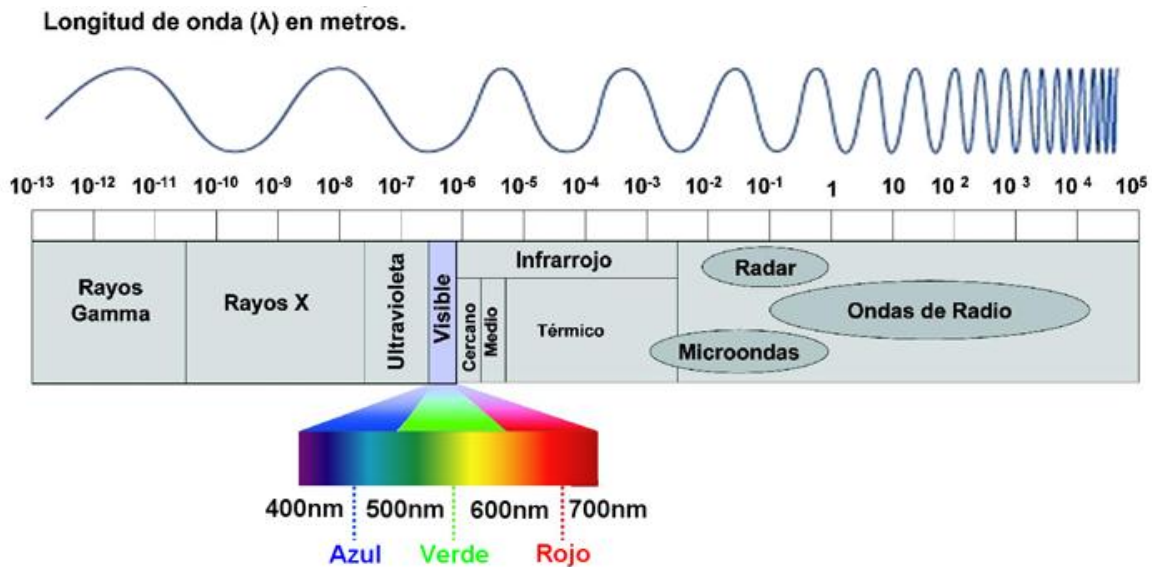


Figura 2.1. Longitudes de onda del espectro electromagnético

Índices de Vegetación

Debido al desarrollo de los sensores satelitales es posible obtener información de la superficie terrestre y monitorear los cambios en la estructura y productividad de la cobertura vegetal. Con los Sistemas de Información Geográfica (SIG) es posible realizar transformaciones de las imágenes satelitales para destacar algunos de los atributos fenológicos de la biomasa vegetal (Soria y Granados, 2005). Estas transformaciones son los Índices de Vegetación.

Existen diversos índices de vegetación, y todos tienen como base el contraste de los valores de reflectancia y absorción de las radiaciones roja ($60 \mu\text{m}$ - $70 \mu\text{m}$) e infrarroja ($70 \mu\text{m}$ - $90 \mu\text{m}$). Estos índices son el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) y el Índice de Vegetación Mejorado (EVI), que proporcionan una representación del grado de verdor de una cobertura vegetal, con lo que es posible hacer deducciones precisas acerca del funcionamiento de la vegetación (Liang *et al.* 2005) .

Los índices de vegetación son usados para discriminar entre la vegetación con alta actividad fotosintética y la vegetación en bases fenológicas iniciales. También permiten diferenciar las zonas vegetadas de otras coberturas; y diferenciar la vegetación sana de aquella senescente o que se encuentra bajo algún tipo de estrés (ej. plagas, cambio de uso de suelo); (Figura 2.2).

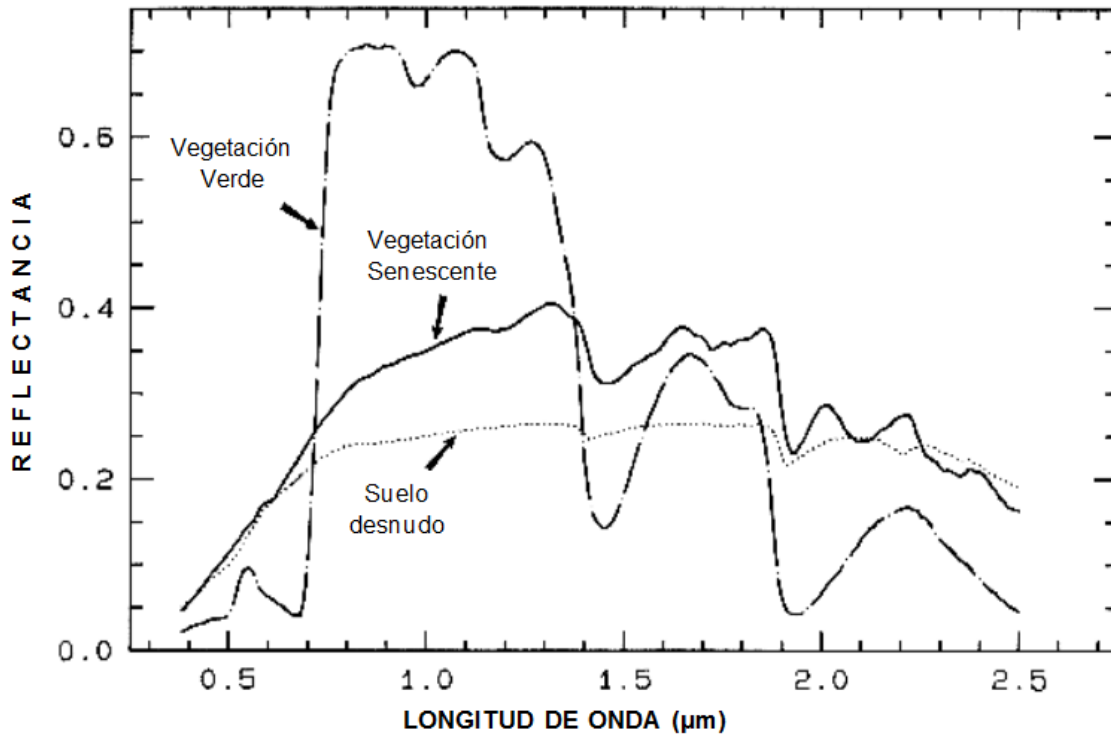


Figura 2.2. Comportamiento espectral de la vegetación. Tomado de Levin, 1999.

El Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI)

El Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI por sus siglas en inglés) fue desarrollado por Rouse *et al.* (1974), y desde entonces ha sufrido algunas adaptaciones para mejorar su exactitud. Al igual que los demás índices de vegetación, el NDVI se calcula usando la reflectancia de las regiones roja e infrarroja del espectro electromagnético. Pero, respecto a otros índices de vegetación, el NDVI tiene la ventaja de tener una gran sencillez de cálculo y de facilitar la interpretación directa de los parámetros biofísicos de la vegetación (Jiménez *et al.* 2009).

El fundamento del índice es el contraste que se genera entre la reflectancia de las radiaciones roja e infrarroja. La vegetación senescente reflejará más energía en el rojo visible, y la vegetación vigorosa reflejará más

energía en el infrarrojo cercano (Figura 2.3). Un mayor contraste entre ambas bandas es indicativo de una vegetación de una mayor actividad fotosintética. Por lo tanto, un valor alto del NDVI será indicativo de una alta actividad fotosintética (Alatorre y Beguería, 2009, 2010; Julien, 2008). En cambio, cuando la vegetación sufre algún tipo de estrés su reflectancia de las radiaciones roja e infrarroja disminuye, por lo que el contraste entre ambas bandas es menor al mostrado por la vegetación vigorosa (Soria y Granados, 2005).

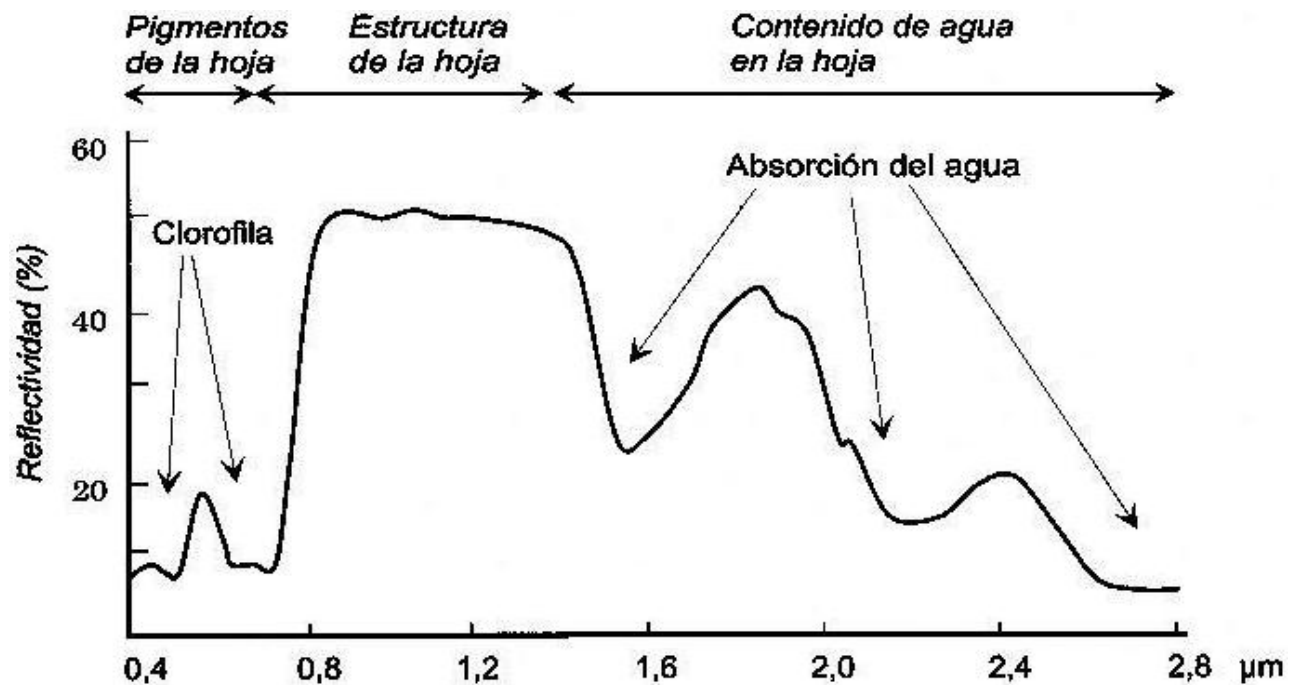


Figura 2.3. Respuesta espectral de la vegetación sana

Lo anterior se debe a que la clorofila en las hojas absorbe parte de la radiación proveniente del sol para llevar a cabo la fotosíntesis. Esta radiación (Radiación Fotosintéticamente Activa - PAR) comprende la región del espectro electromagnético $0,4\mu\text{m} - 0,71\mu\text{m}$, y está asociada con valores bajos de reflectancia y transmitancia (figura 2.4). Mientras que la región de $1,3\mu\text{m}$ a $2,5\mu\text{m}$ corresponde a altos niveles de reflectancia y transmitancia debido a que la absorción es muy poca (Tucker y Sellers, 1986).

La estructura celular de las hojas refleja la radiación infrarroja, por lo tanto, mientras más hojas haya en una cubierta vegetal, mayor será la reflectancia en esta región del espectro. La vegetación senescente refleja más luz visible que infrarroja.

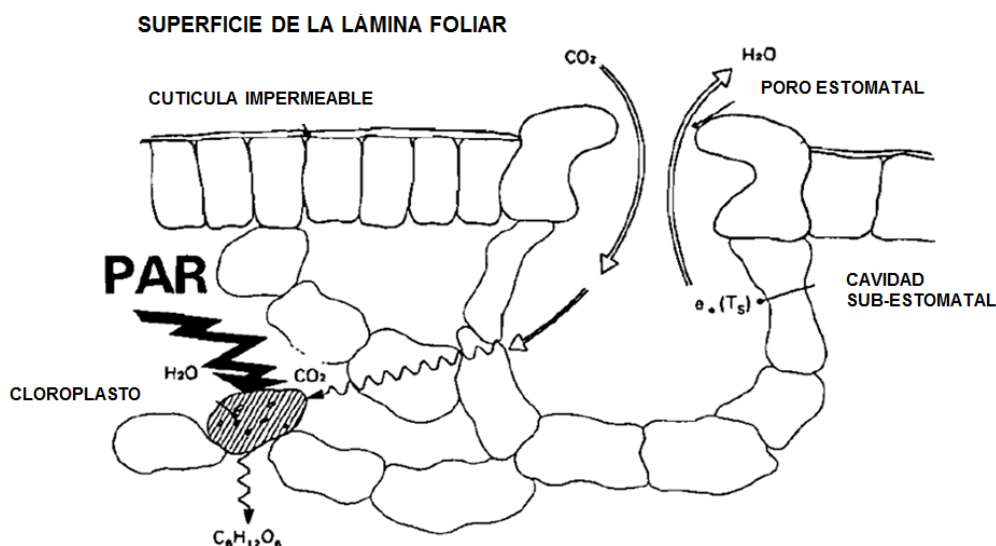


Figura 2.4. Radiación fotosintéticamente activa y fotosíntesis. Tomado de Tucker y Sellers, 1986.

Las tendencias temporales de algunos indicadores de la productividad de la vegetación, como el grado de verdor, pueden servir de herramientas para la identificación de zonas degradadas y zonas que se conservan integra (Bai y Dent, 2006). Las tendencias temporales del NDVI se han empleado ampliamente en el estudio de la cobertura vegetal. Entre las aplicaciones que se le han dado se encuentran el análisis de la respuesta de los ecosistemas a los cambios climáticos (Jiménez *et al.* 2009; Liang *et al.* 2011), monitorear el crecimiento de la vegetación, la cobertura vegetal y la producción de biomasa (De Badts *et al.*, 2005; Julien, 2008), estudios sobre los procesos de regeneración de la vegetación en zonas devastadas (Riaño *et al.* 2002), identificación de zonas degradadas por procesos de erosión (Alatorre y Beguería, 2010) y el monitoreo de los procesos ecológicos en áreas naturales protegidas (Alcaraz-Segura *et al.*, 2008).

III. METODOLOGÍA

Descripción del área de estudio

El área de estudio comprende parte de los Estados de Aguascalientes, Hidalgo, Jalisco, Michoacán, Querétaro, San Luis Potosí, Zacatecas y gran parte del Estado de Guanajuato (Figura 3.1). La zona se delimitó en base a un mapa de subcuencas hidrológicas (CONABIO, 1998). La zona es la más importante por su densidad poblacional después de la Zona Metropolitana del Valle de México y también es la segunda más importante en cuanto a la producción de alimentos después de la Zona Pacífico en Sinaloa.

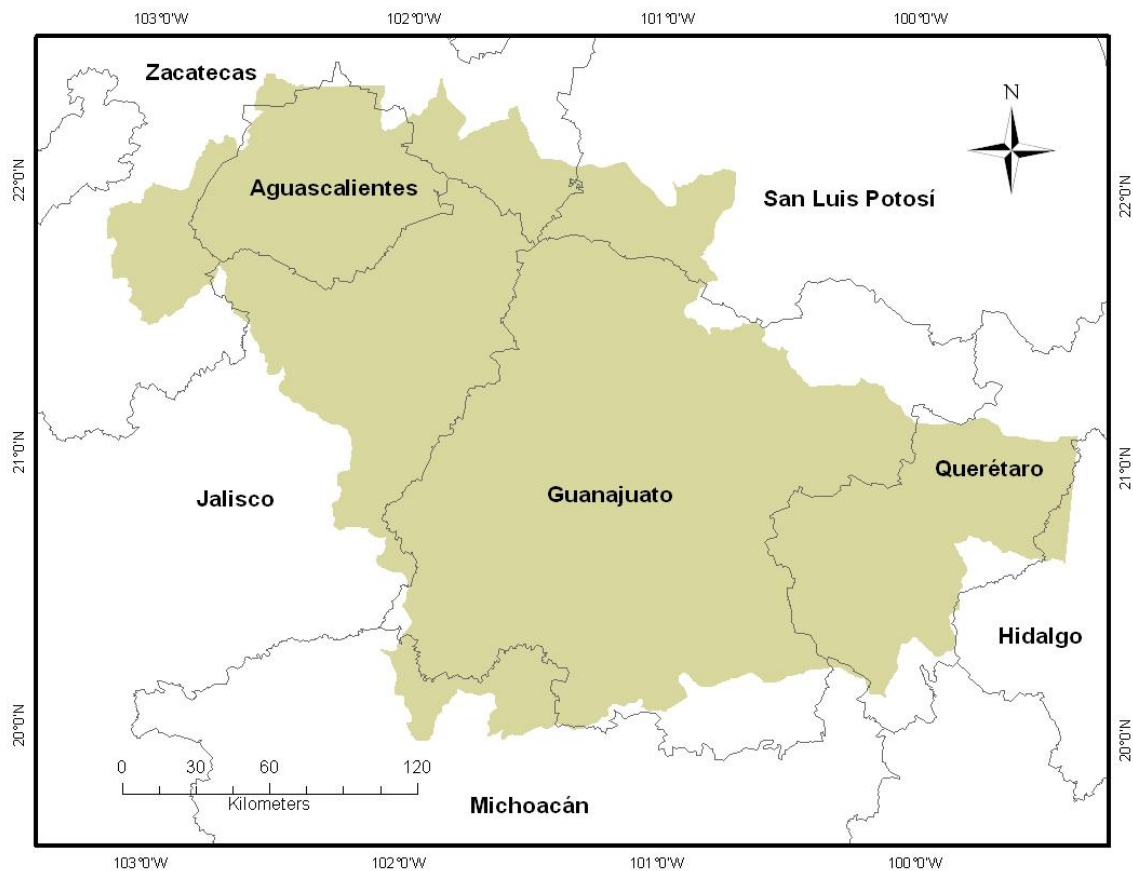


Figura 3.1. Zona de estudio

La mayor parte del área de estudio comprende parte de la región Sur del Altiplano mexicano ubicado en la parte centro - norte del país (Figura 3.2). Es una región semidesértica cuya actividad económica se ha enfocado principalmente en la explotación de yacimientos minerales (Nieto-Samaniego, 2005). La región sur se caracteriza por tener las cotas más elevadas, más de la mitad de la superficie de esta región se encuentra por arriba de los 2000 msnm, con excepción del valle de Aguascalientes. La región se encuentra principalmente cubierta por roca volcánica y presenta menor grado de erosión que el Altiplano norte.

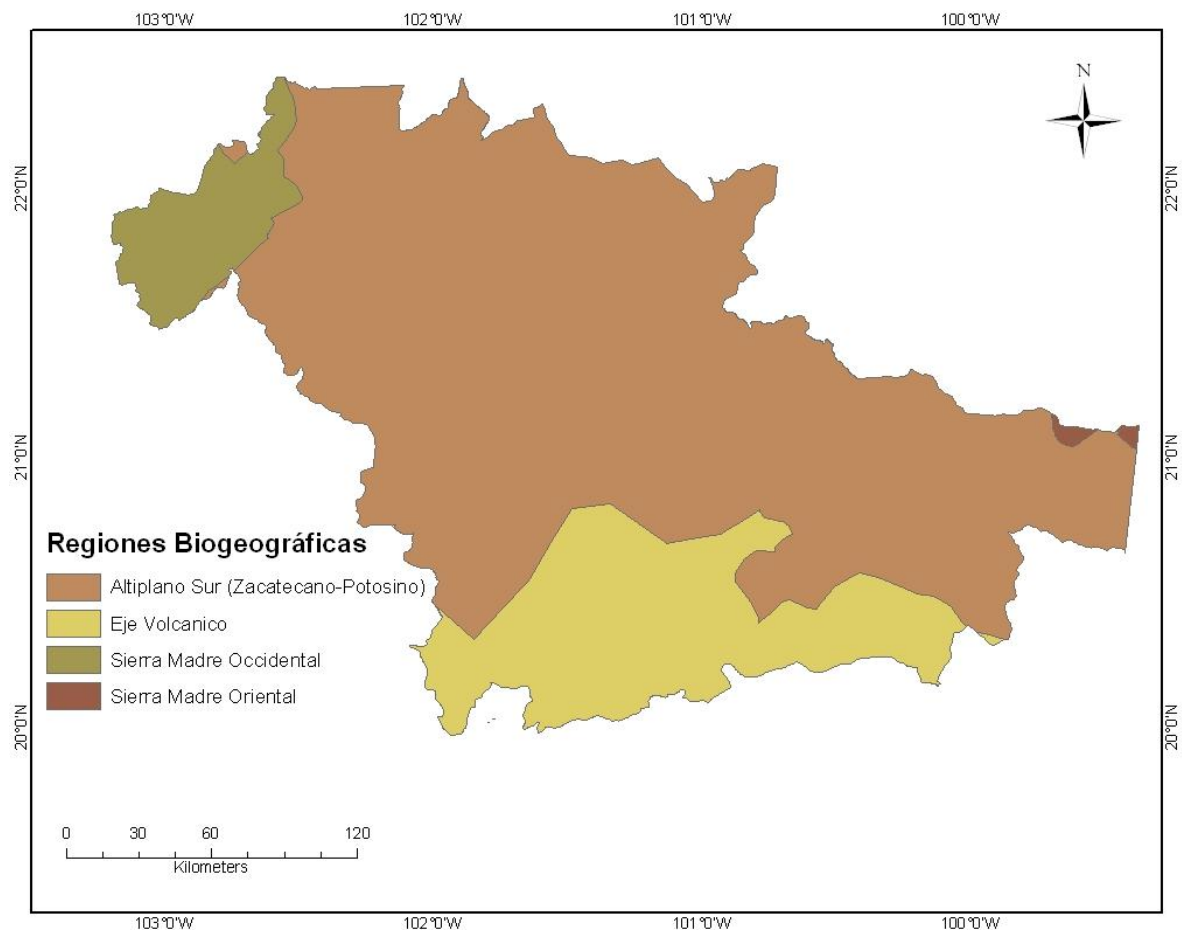


Figura 3.2. Mapa de Provincias Biogeográficas incluidas en el área de estudio (CONABIO, 1997).

A su vez, la zona se divide en nueve regiones hidrográficas, siendo las principales, las del Río Santiago, Río Panuco y Lerma - Chapala (INEGI-INECONAGUA, 2007). En la zona se encuentran algunos cuerpos de agua grandes como la Laguna de Yuriria al sur del Estado de Guanajuato.

De acuerdo a la clasificación de Köppen (1948), usando las modificaciones de clima y tipología de la vegetación adaptadas para México por García y Rzedowski (CONABIO, 1998), los tipos de clima presentes en la región son los climas B de tipo seco, que prevalecen en la mayor parte del Altiplano mexicano, al noreste y centro de la zona de estudio; los de tipo (A)C, semicálidos que abarcan parte del centro y suroeste de la zona; y los de tipo C, templados húmedos y subhúmedos, que se localizan en las zonas de mayor elevación.

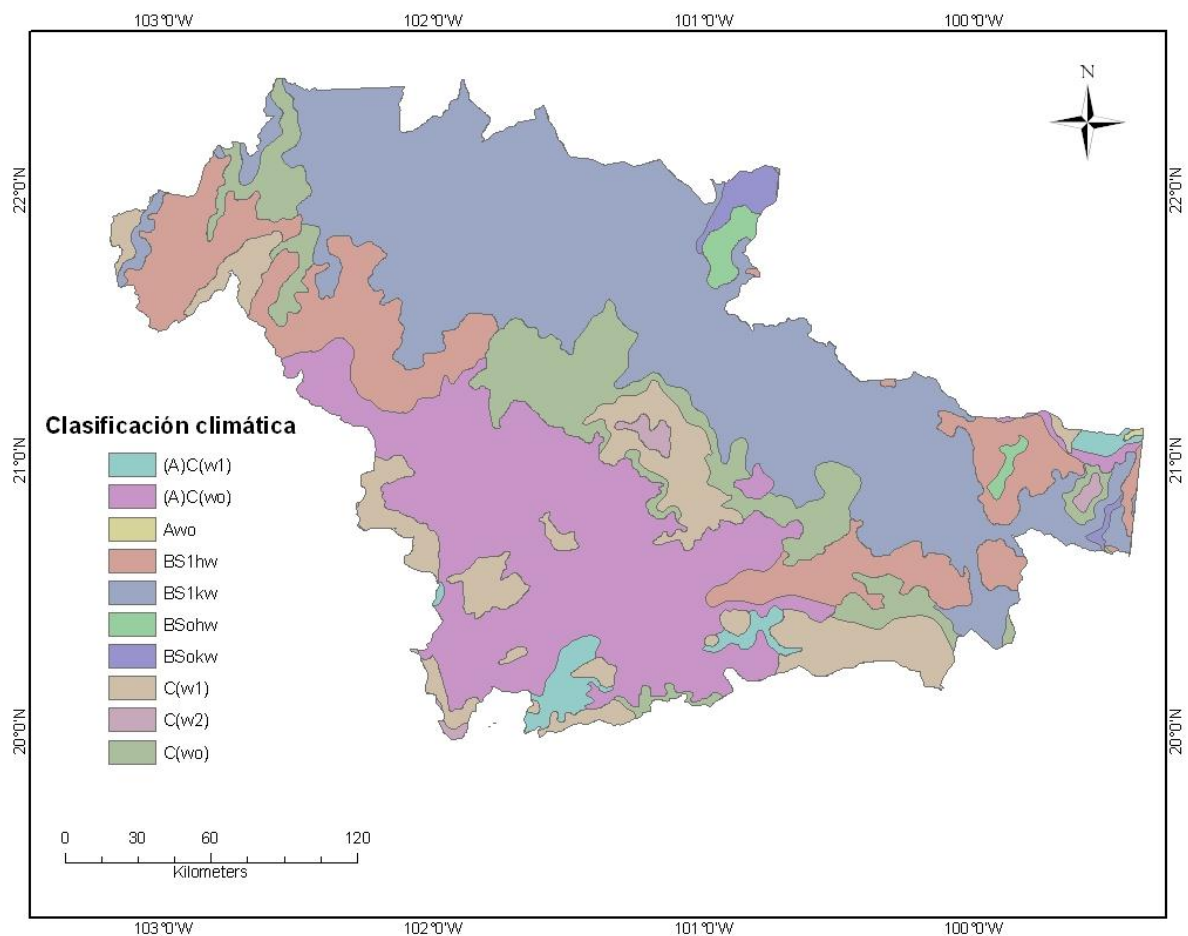


Figura 3.3. Clasificación climática de la zona de estudio, en base a las modificaciones de clima y vegetación de García y Rzedowski para la clasificación de Köppen (CONABIO, 1998)

La parte este de la zona se caracteriza por ser mayormente de clima semiárido, templado, con temperatura media anual entre 12°C y 18°C. Al centro y oeste de la zona se encuentran climas semicálidos subhúmedos, con temperatura media anual mayor a 18°C; y templados subhúmedos con temperatura media anual entre 12°C y 18°C (Figura 3.3)

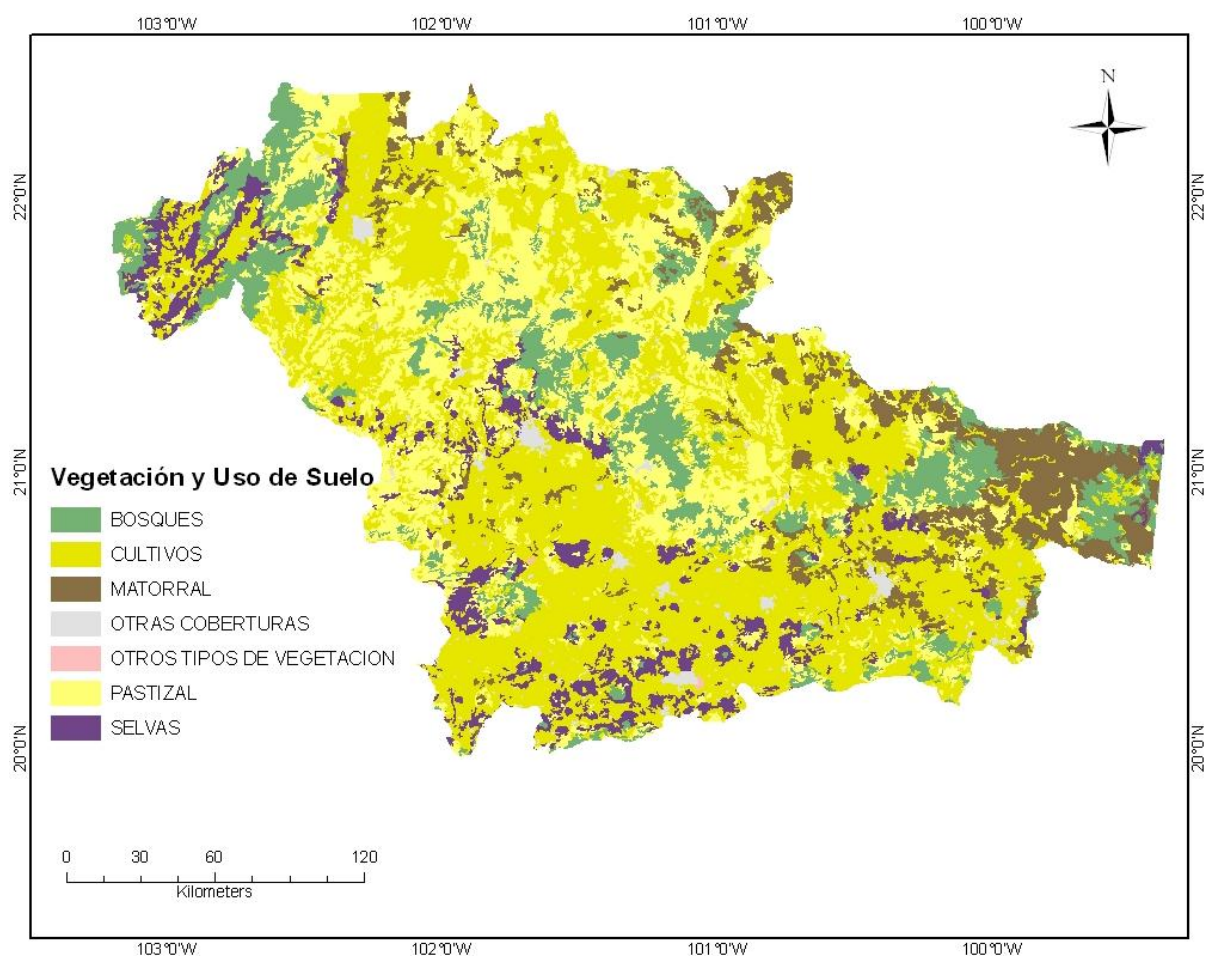


Figura 3.4. Vegetación y uso de suelo. Inventario Nacional Forestal, CONAFOR, 2000.

La vegetación ha sufrido alteraciones en gran parte de la zona de estudio, una gran superficie ha sido destinada a actividades agrícolas (Carranza, 2005). Las principales formaciones vegetales en la zona son pastizales naturales (pastizal-huizachal), mezquital y matorral xerófilo (submontano). Además se registran algunas zonas dispersas de bosque (encino, pino – encino y latifoliadas), así como algunos manchones de selvas caducifolias y subcaducifolias (Figura 3.4).

Procesamiento de las imágenes satelitales

Para este trabajo se utilizó una base de datos de imágenes Landsat 5 TM para el periodo de 1993-2009. La razón por la que se seleccionó esta base de datos es porque cuenta con el registro histórico más extenso, con imágenes desde 1982. La base de datos comprende 36 imágenes, seis imágenes de cada escena (Apéndice 1). La información satelital se obtuvo gratuitamente en la red, del Archivo Landsat (colección Landsat 5 TM), de los archivos del USGS (U.S. Geological Survey).

El sensor Thematic Mapper (TM), que se encuentra a bordo del satélite Landsat 5 de la NASA, ha adquirido imágenes de la Tierra casi continuamente desde Julio de 1982 hasta el presente año. Las imágenes Landsat TM consisten en siete bandas espectrales (Cuadro 3.1). La resolución espacial es de 30 metros para las bandas 1-5 y 7. La resolución de la banda 6 (infrarrojo térmico) es de 120 metros. El tamaño aproximado de las escenas es de 170 km norte - sur por 183 km este - oeste. Su resolución temporal, es decir, el tiempo que pasa desde la obtención de una imagen de un punto de la tierra hasta la siguiente toma, es de 16 días.

Cuadro 3.1. Longitudes de onda para las bandas en el sensor Thematic Mapper (TM)

| Banda sensor TM Landsat 5 | Resolución (micrómetros) | Metros |
|---------------------------|--------------------------|--------|
| Banda 1 | 0.45 - 0.52 | 30 |
| Banda 2 | 0.52 - 0.60 | 30 |
| Banda 3 | 0.63 - 0.69 | 30 |
| Banda 4 | 0.76 - 0.90 | 30 |
| Banda 5 | 1.55 - 1.75 | 30 |
| Banda 6 | 10.40 - 12.50 | 120 |
| Banda 7 | 2.08 - 2.35 | 30 |

La zona de estudio comprende seis escenas: p27r45, p27r46, p28r44, p28r45, p28r46, p29r45 (Figura 3.5). De cada una de las escenas se obtuvieron imágenes correspondientes al periodo de Agosto a Noviembre. Se eligió este rango de meses por ser los que representan el pico más alto en el desarrollo de la vegetación, además se amplió el rango hasta el mes de noviembre debido a la limitada disponibilidad de escenas en la temporada con bajo porcentaje de nubosidad. Se esperaba que en este rango se pueda apreciar una diferencia notoria del cambio en el grado de verdor de la cobertura vegetal durante el periodo de estudio. Para la selección de imágenes se tomó en cuenta el factor de cobertura de nubes, ya que ésta puede alterar o causar una interpretación errónea del NDVI.

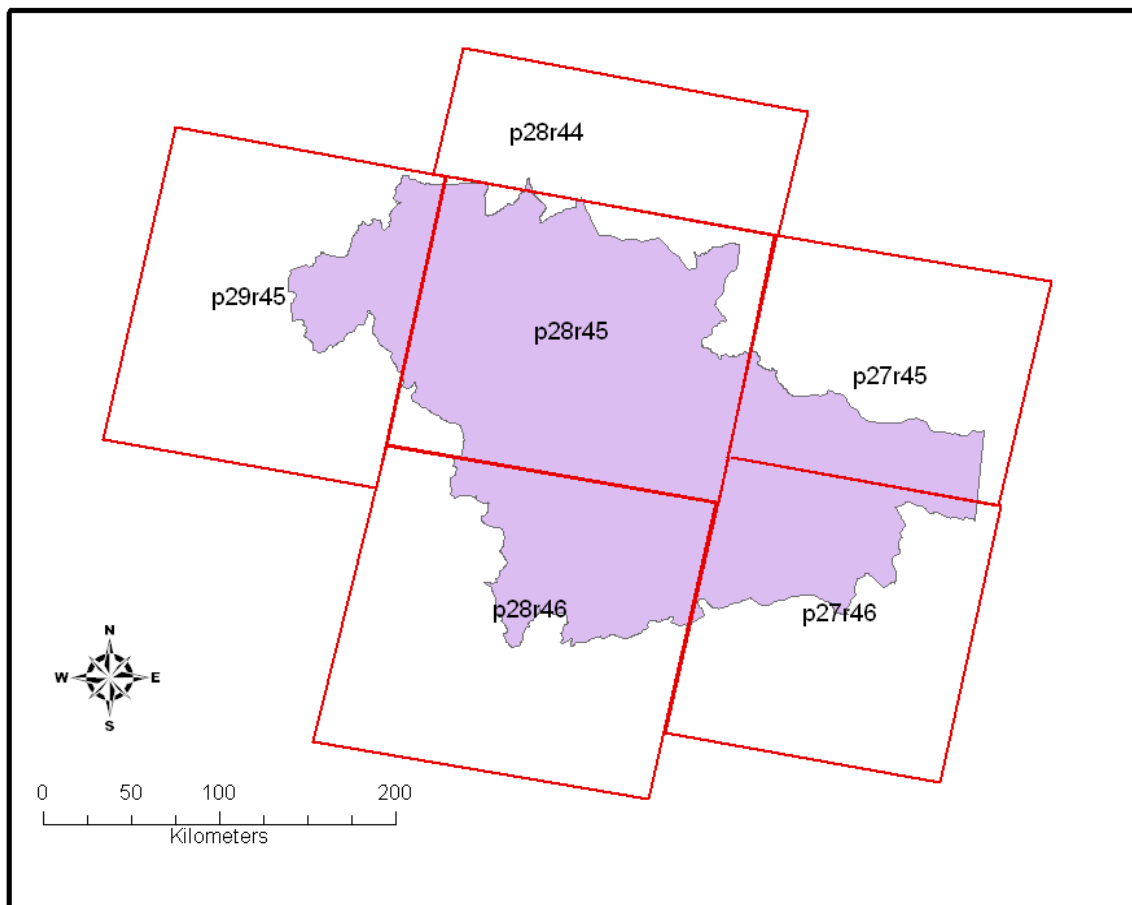


Figura 3.5. Escenas que comprenden la zona de estudio (Landsat TM)

Debido a la limitada disponibilidad de imágenes en línea, se completaron solamente seis mosaicos de la zona de estudio para los años 1993, 1994, 1997, 1999, 2000 y 2009. Los productos disponibles en línea son imágenes estándar. Estas imágenes fueron procesadas con la *Standard Terrain Correction* (nivel 1T), es decir que cuentan con exactitud geométrica y radiométrica obtenida mediante puntos de control en tierra y la aplicación de un Modelo de Elevación Digital (DEM, por sus siglas en inglés) para la exactitud topográfica.

Para este trabajo solamente se utilizaron las bandas 3 (0,63µm a 0,69µm - rojo) y 4 (0,76µm a 0,90µm - infrarrojo cercano). El rango de longitud de onda de las bandas del sensor TM de Landsat, en comparación con otros sensores, permite mejorar la discriminación entre suelo y vegetación, y disminuir el efecto de relieve (pendiente y orientación) en la caracterización espectral de las diferentes coberturas vegetales (Soria y Granados, 2005). El primer paso fue crear puntos de control en cada una de la imágenes para referenciarlas y alinear todas las imágenes de la serie temporal para cada una de las escenas que conforman el mosaico del área de estudio, de manera que coincidieran en todos los píxeles para poder llevar a cabo el análisis de regresión de la serie de tiempo.

Cálculo del NDVI

Se calculó el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) para cada una de las escenas. El NDVI permite identificar masas de vegetación, haciendo una discriminación entre áreas forestadas y deforestadas, así como diferenciar entre las diferentes coberturas vegetales. El cálculo del NDVI se obtiene mediante la siguiente ecuación (Rouse *et al.*, 1974):

$$NDVI = (IRc - R)/(R - IRc)$$

Donde IRc es la región del infrarrojo cercano en el espectro electromagnético (0,76µm - 0,90µm) y R es la región del rojo visible (0,63µm - 0,69µm).

Los valores que arroja este índice se encuentran dentro del rango -1 a 1. Los valores altos del NDVI son indicativo de una alta actividad fotosintética de la cubierta vegetal (Alatorre y Beguería, 2010). Para obtener imágenes completas de la zona de estudio para los diferentes años, se crearon mosaicos con las seis escenas que la comprenden. Se recortaron los mosaicos con una capa de la zona de estudio, por medio de las herramientas de análisis espacial de ArcMap (ESRI).

Regresión lineal y análisis de tendencia del Δ NDVI

Se realizó un análisis de la serie temporal del NDVI para obtener las tendencias del cambio de la vegetación. El método más comúnmente aplicado para análisis de tendencia en series temporales es el de mínimos cuadrados (OLS, por sus siglas en inglés) (De Beurs y Henebry, 2003). Sin embargo, en éste trabajo se aplicó el modelo de regresión Theil-Sen, el cual es un estimador no paramétrico altamente recomendado en el análisis de series temporales cortas, ya que produce un resultado más confiable en comparación con otros modelos de regresión. Este estimador se caracteriza por su robustez frente a los efectos de valores extremos, ya que la estimación de pendiente media Theil-Sen no se ve afectada por valores extremos hasta que éstos superan el 29% de la longitud total de la serie. El estimador Theil-Sen esta formulado para un modelo de regresión lineal simple, y ha tenido importantes aplicaciones en la teledetección y para censar datos (Fernandes y Leblanc, 2005). Las tendencias de la serie temporal se calculan obteniendo la pendiente de las medianas para cada píxel. El análisis se realizó por medio del Software de Procesamiento de Imágenes IDRISI Taiga (Clark Labs).

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Cálculo del NDVI

El cálculo del NDVI se realizó de manera independiente para cada uno de los píxeles que forman la imagen satelital. Las figuras 4.1 – 4.6 presentan el cálculo del NDVI obtenido para cada uno de los años del estudio. Las imágenes se presentan en escala de colores, donde las tonalidades cálidas representan los píxeles con menor grado de verdor de la vegetación, mientras que los colores fríos representan las áreas más verdes en la escena. Se añadió información sobre las curvas de nivel de la zona de estudio, ya que la altitud es un factor directamente relacionado con los valores de NDVI y ayuda a discriminar entre las diferentes coberturas vegetales (Dedios, 2009)

Los valores de NDVI correspondientes a la vegetación oscilan entre 0.2 y 0.8. El umbral crítico para la vegetación es $NDVI = 0.1$ (Soria y Granados, 2005). Los valores bajos de NDVI (< 0.1) corresponden a suelos desnudos, arena y nieve. Los cuerpos de agua presentan valores de NDVI muy cercanos a cero, ya que su superficie absorbe de igual manera la luz visible y la radiación infrarroja.

La pérdida de continuidad que se presenta en algunas de las imágenes se debe a que los mosaicos de la zona de estudio se construyeron con imágenes de diferentes meses, ya que la cobertura de nubes en la temporada dificultó la obtención de una serie más homogénea; sin embargo, esta diferencia no afecta el objetivo final del análisis, el cual es obtener una tendencia general del cambio del NDVI para el periodo del estudio.

Cuadro 4.1. Estadísticas para el NDVI de las imágenes de 1993 a 2009

| Año | \bar{X} | σ | Mínimo | Máximo |
|------|-----------|----------|--------|--------|
| 1993 | 0.22 | 0.14 | -0.68 | 1 |
| 1994 | 0.21 | 0.13 | -0.78 | 0.97 |
| 1997 | 0.24 | 0.15 | -0,96 | 1 |
| 1999 | 0.17 | 0.11 | -0.62 | 0.97 |
| 2000 | 0.31 | 0.18 | -0.69 | 0.98 |
| 2009 | 0.20 | 0.13 | -1 | 0.87 |

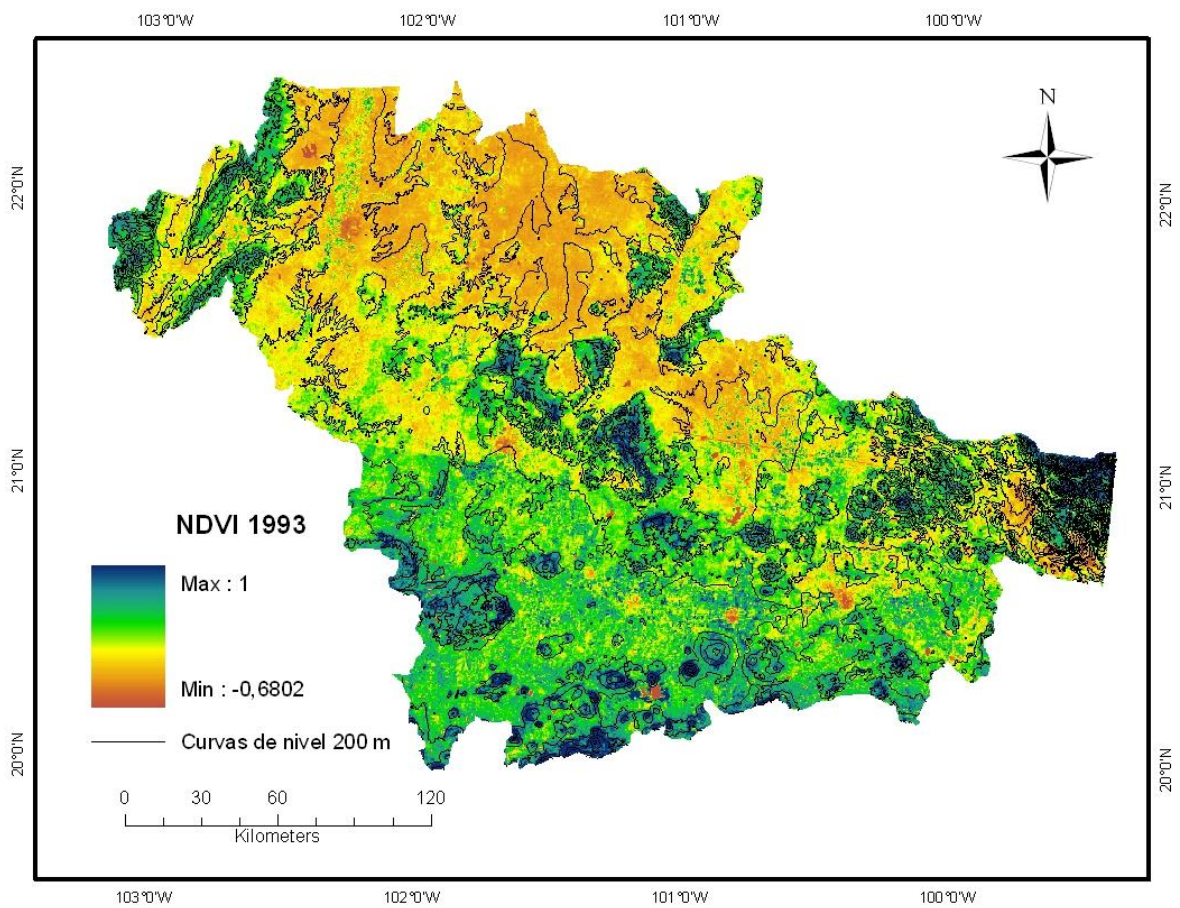


Figura 4.1 Cálculo del NDVI para el año 1993 Con información de la altitud, curvas de nivel cada 200 m, extraído del Modelo Digital del Terreno escala 1:250000 de INEGI (CONABIO, 1998).

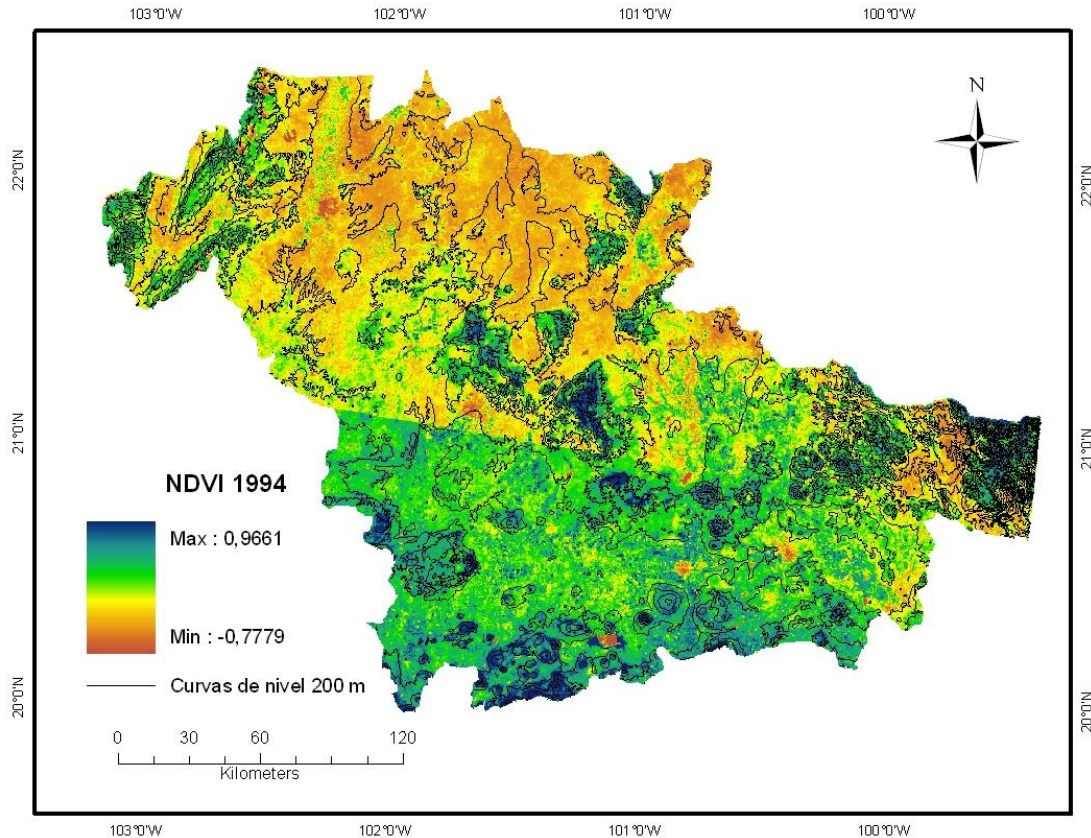


Figura 4.2. Cálculo del NDVI para el año 1994 e información de la altitud, con curvas de nivel cada 200 m, extraído del Modelo Digital del Terreno escala 1:250000 de INEGI (CONABIO, 1998).

Los valores del NDVI son consistentes con la clasificación de vegetación y uso de suelo del Inventario Nacional Forestal (CONAFOR, 2000). Los valores más altos del NDVI (0.5 – 0.9) se encuentran distribuidos en las zonas más altas y corresponden a las zonas de bosque y algunas zonas de agricultura de riego. La vegetación árida presenta valores de NDVI entre 0.2 y 0.4 y se distribuye principalmente en las zonas con menor altitud, con excepción de las selvas bajas en la Sierra Occidental. Entre ese rango de NDVI también se encuentran gran parte de las zonas de agricultura de temporal y riego. Los valores de NDVI < 0.1 corresponden a barrancas y zonas de suelo desnudo, cuerpos de agua y zonas agrícolas no cultivadas.

La zona sur del área de estudio presenta valores más altos del NDVI en comparación con la zona norte, esto puede deberse a la distribución de las

precipitaciones, que son mayores (entre 600 mm – 1000 mm) para la parte de Jalisco, Michoacán y el sur de Guanajuato y Querétaro, mientras que para Zacatecas, Aguascalientes y norte de Guanajuato la precipitación anual es de 300 mm a 600 mm. Los valores de NDVI para el 2009 disminuyen, lo que puede estar relacionado con la baja en las precipitaciones que se presentó ese año en los estados que conforman el área de estudio.

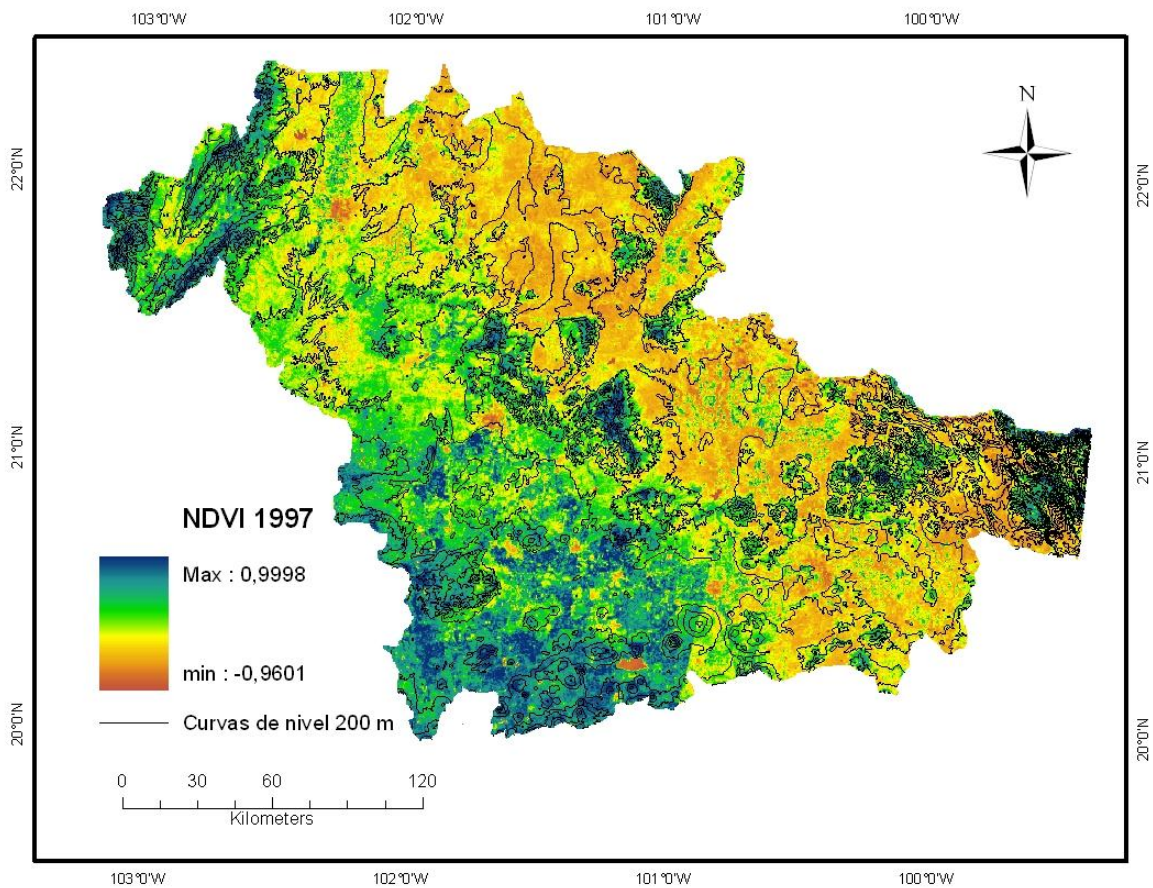


Figura 4.3. Cálculo del NDVI para el año 1997 e información de la altitud, con curvas de nivel cada 200 m, extraído del Modelo Digital del Terreno escala 1:250000 de INEGI (CONABIO, 1998).

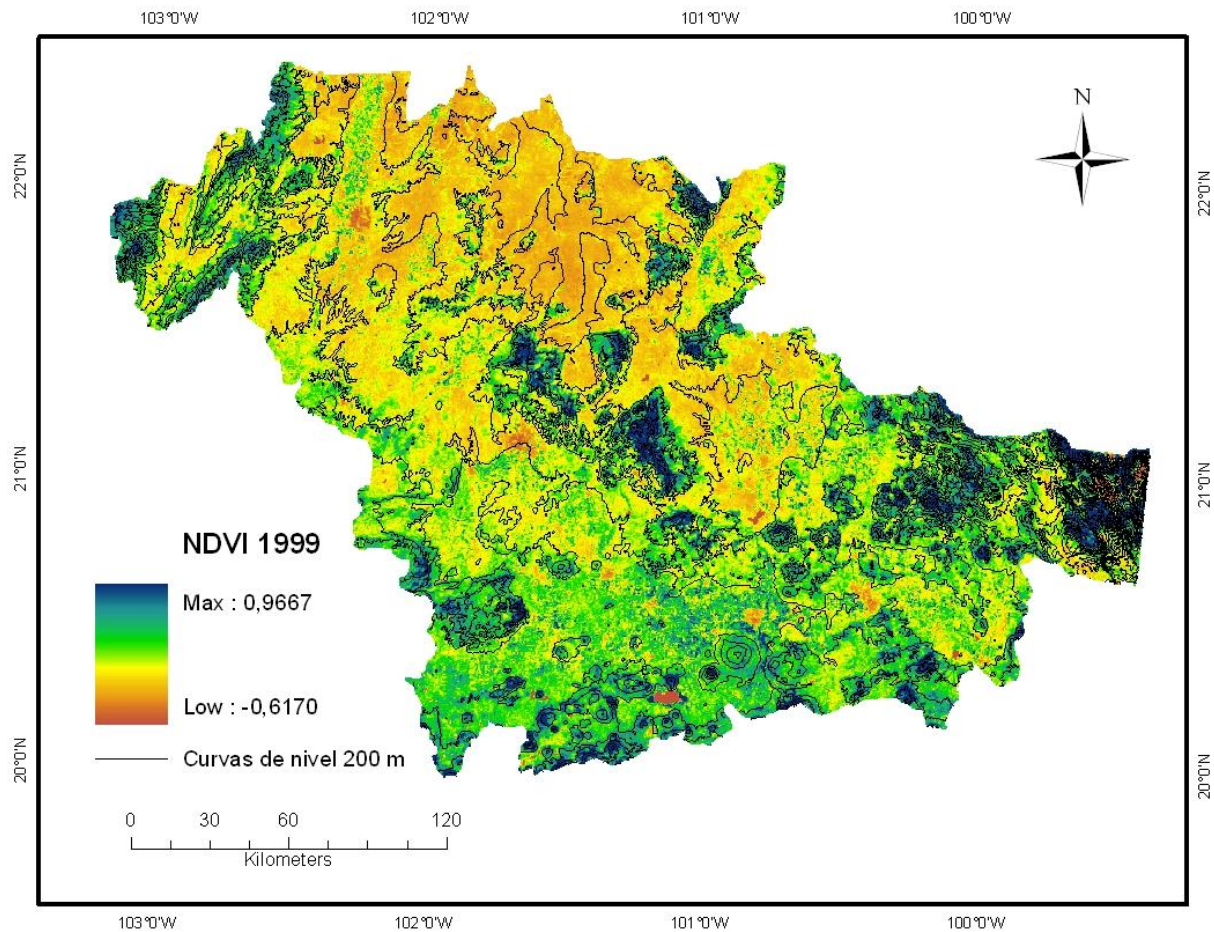


Figura 4.4. Cálculo del NDVI para el año 1999 e información de la altitud, con curvas de nivel cada 200 m, extraído del Modelo Digital del Terreno escala 1:250000 de INEGI (CONABIO, 1998).

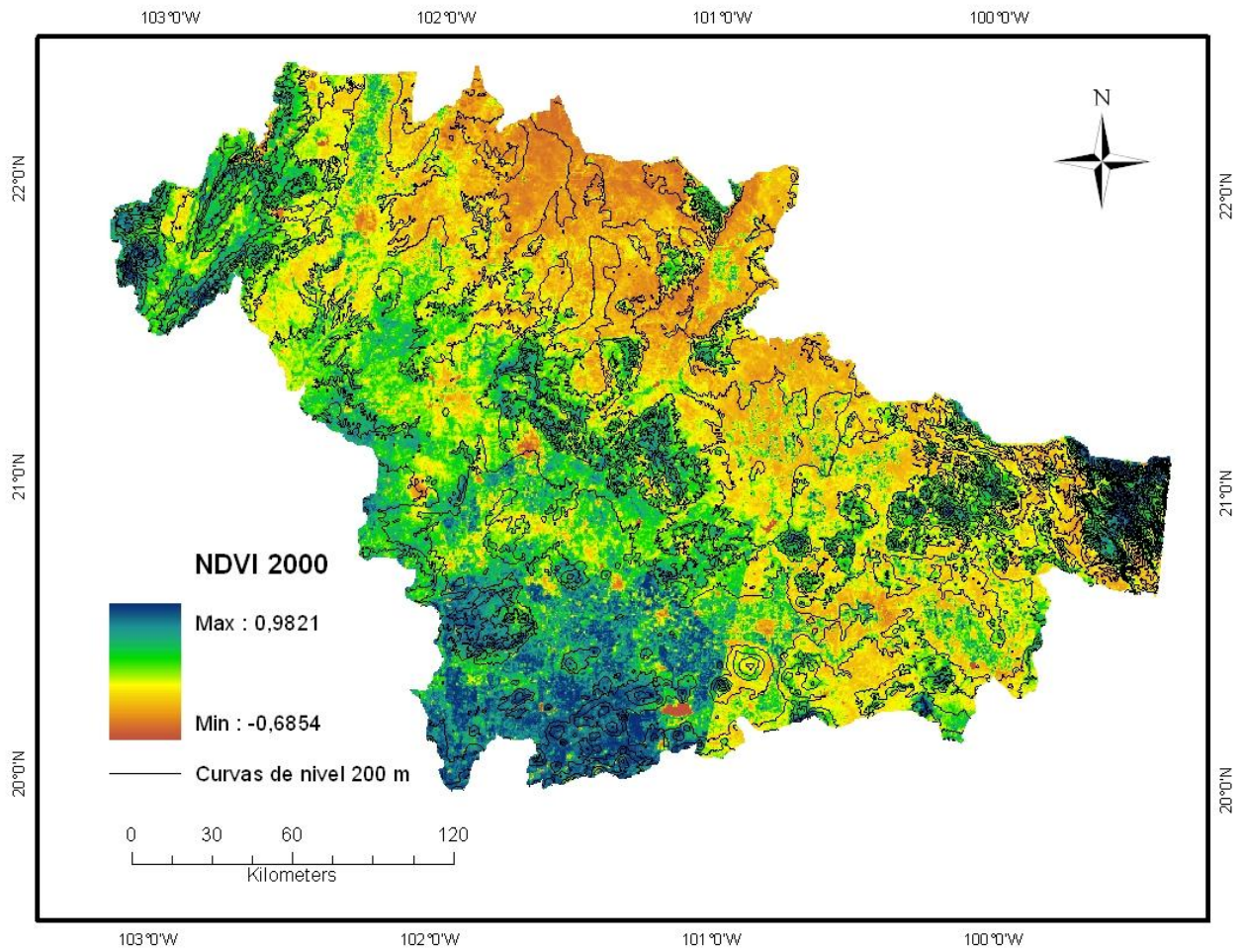


Figura 4.5. Cálculo del NDVI para el año 2000 e información de la altitud, con curvas de nivel cada 200 m, extraído del Modelo Digital del Terreno escala 1:250000 de INEGI (CONABIO, 1998).

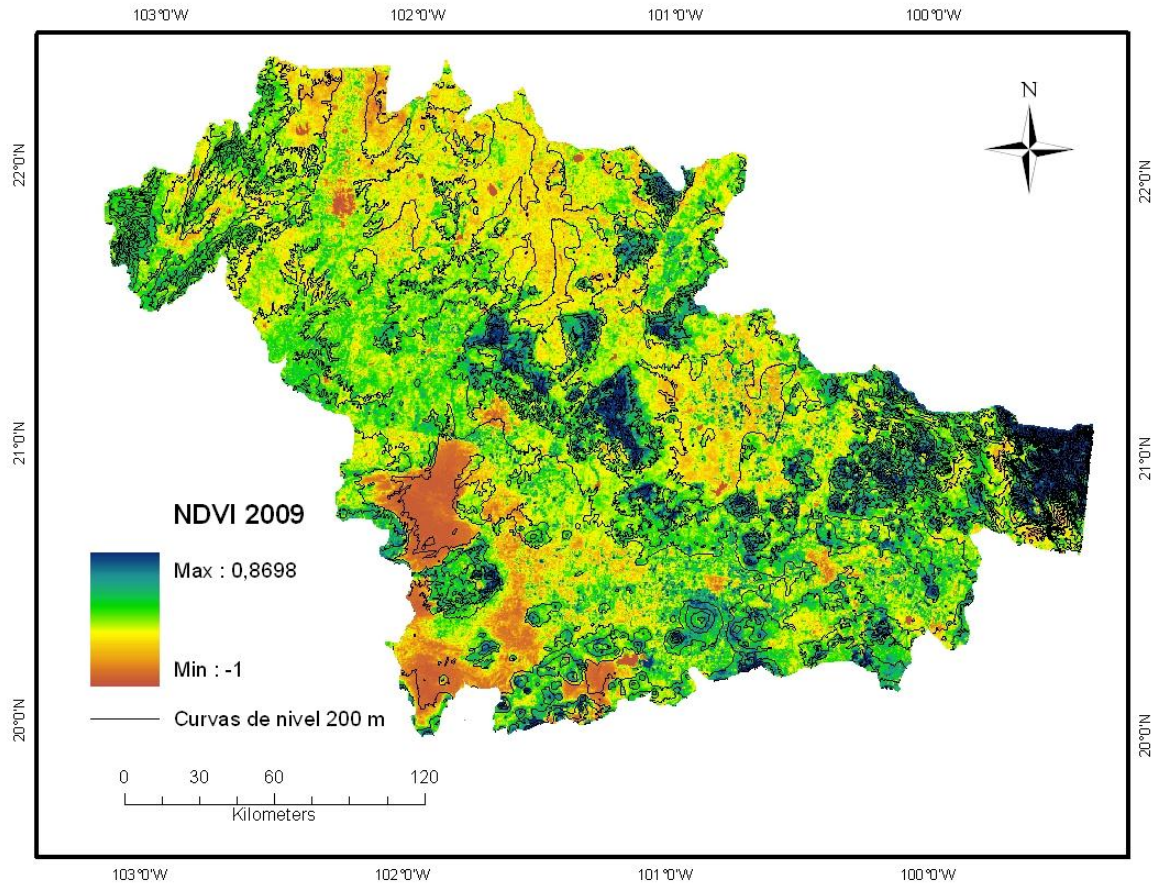


Figura 4.6. Cálculo del NDVI para el año 2009 e información de la altitud, con curvas de nivel cada 200 m, extraído del Modelo Digital del Terreno escala 1:250000 de INEGI (CONABIO, 1998).

La resolución espacial de las imágenes Landsat TM facilitó la discriminación entre los diferentes tipos de coberturas que componen el área de estudio, ya que a menor tamaño de pixel disminuye la posibilidad de que el valor de NDVI sea un compuesto entre el valor de dos tipos de vegetación contiguos; de este modo los límites de cada cobertura se marcan con más precisión.

Regresión lineal y análisis de la tendencia del Δ NDVI

El análisis de las tendencias del Δ NDVI por medio del estimador Theil-Sen proporciona una imagen de la zona de estudio con la mediana del cambio del NDVI de los diferentes años para cada píxel. La tendencia observada para cada píxel es independiente del resto de los píxeles (Figura 4.7). Los valores cercanos a cero indican pendientes menos pronunciadas, mientras que los valores más alejados al cero son indicativos de cambios más intensos en el verdor de la vegetación y por lo tanto en la actividad fotosintética de la cubierta vegetal.

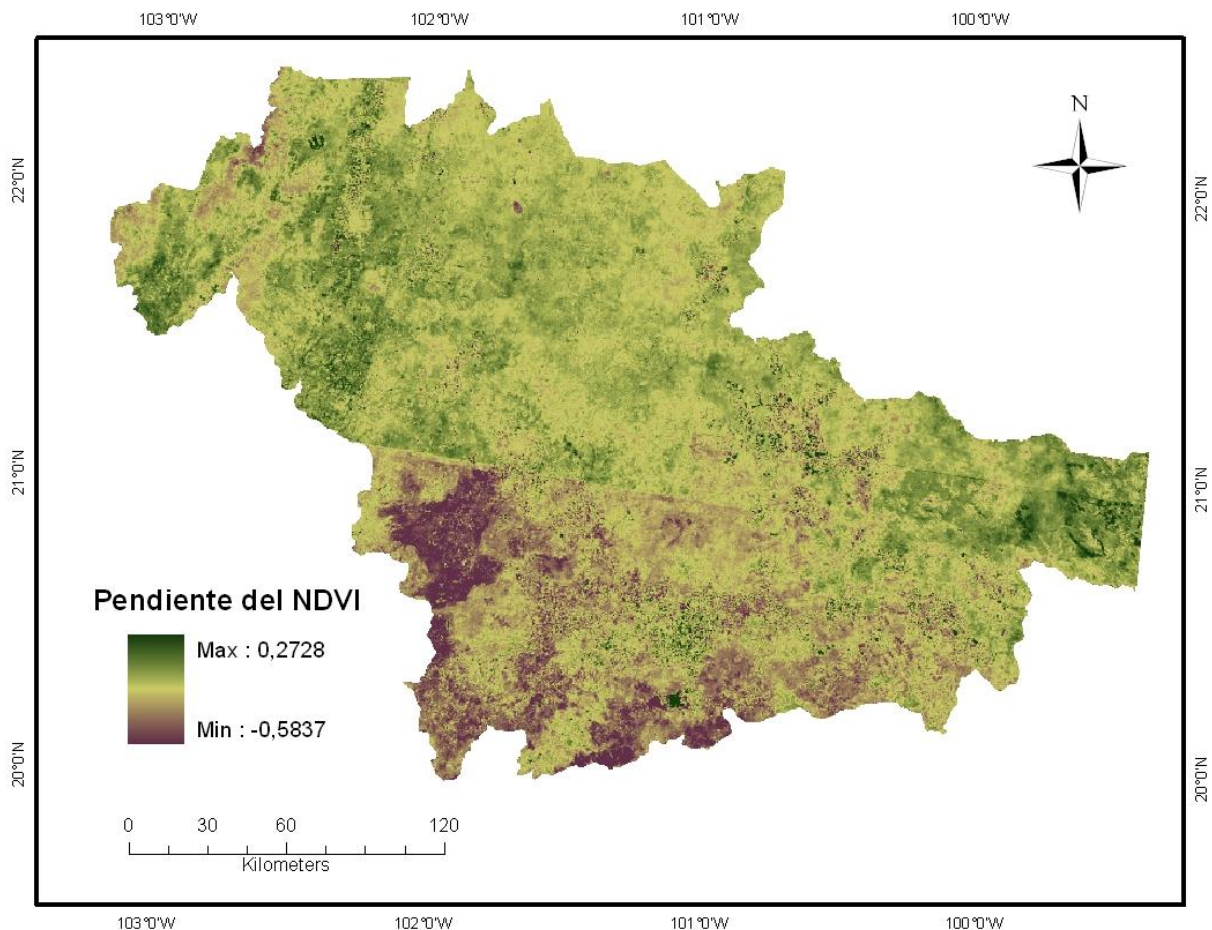


Figura 4.7. Cálculo de la tendencia del NDVI por medio del estimador no paramétrico Theil-Sen.

En la imagen de las tendencias del NDVI se aprecia una marcada diferencia en los datos al sureste de la zona de estudio. Esto se debe a que la fecha de adquisición de las imágenes en esta escena (p28r46) varía mucho en cuanto a los meses de adquisición de las imágenes. La serie temporal para esta escena contiene imágenes que ocupan los extremos del rango mensual, es decir contiene imágenes de agosto y noviembre, por lo que existe una importante variación en el estado de la vegetación, y debido a que la serie temporal es corta, estos valores extremos inclinaron la pendiente hacia valores negativos.

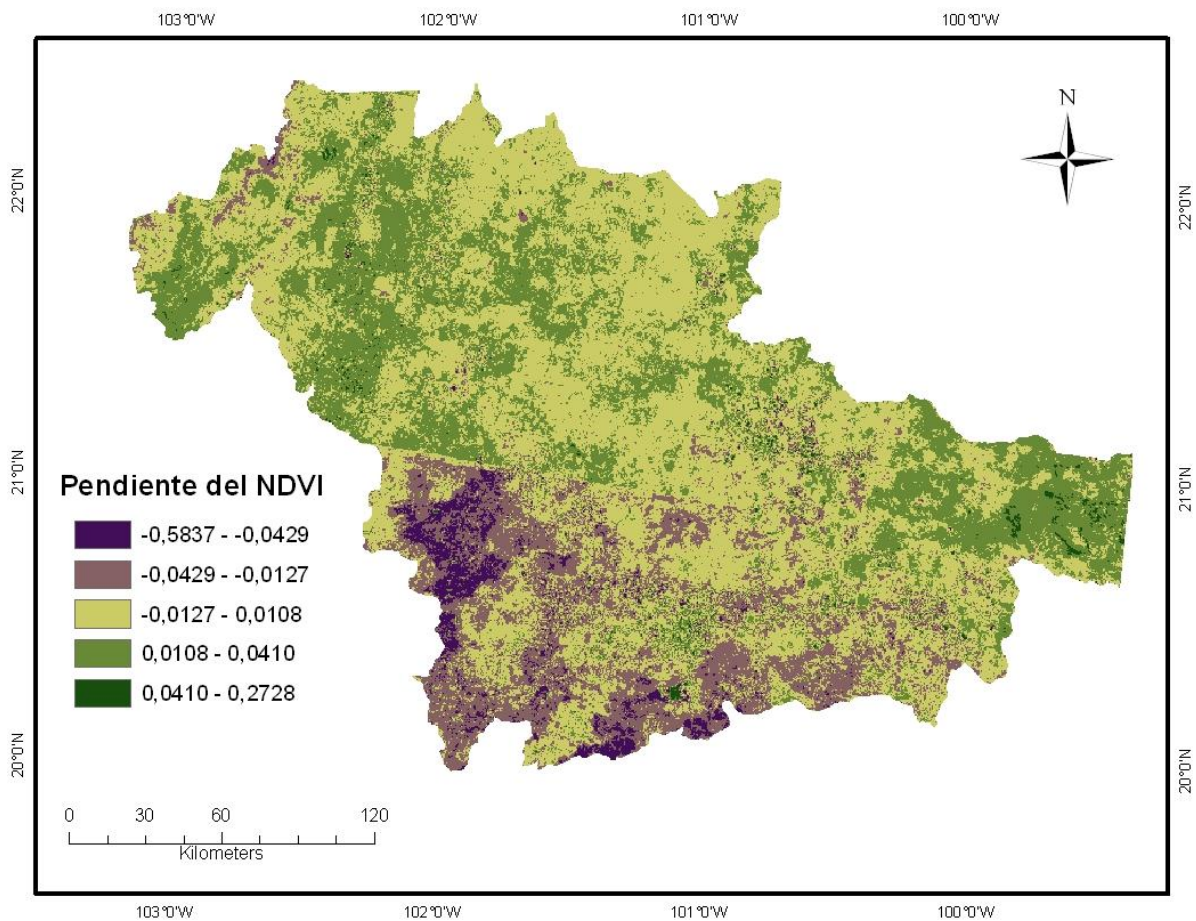


Figura 4.8. Valores de tendencia de cambio del NDVI clasificados.

La media del ΔNDVI para la totalidad del área de estudio es $0,001537 \pm 0,0254$ (media y desviación estándar). La mayor parte del área de estudio presenta tendencias positivas (figura 4.7). Sin embargo, los valores de pendiente negativos fueron mayores ($\Delta\text{NDVI} = -0,5837$), lo que indica que los cambios

negativos fueron más pronunciados. Cerca del 95% de los valores se encuentran dentro del rango -0,06 a 0,06. De manera general, se aprecia muy poca variación en los valores de NDVI durante el periodo de estudio, y permanecen constantes para la mayor parte de la zona (Figura 4.8).

En la figura 4.9 se muestran las zonas que obtuvieron un valor de NDVI < 0.1 constante durante el periodo. Estos píxeles corresponden a las áreas donde se ubican los asentamientos humanos, los cuerpos de agua, barrancas y zonas sin vegetación que se distribuyen principalmente al norte en la región más árida, que corresponde al Altiplano.

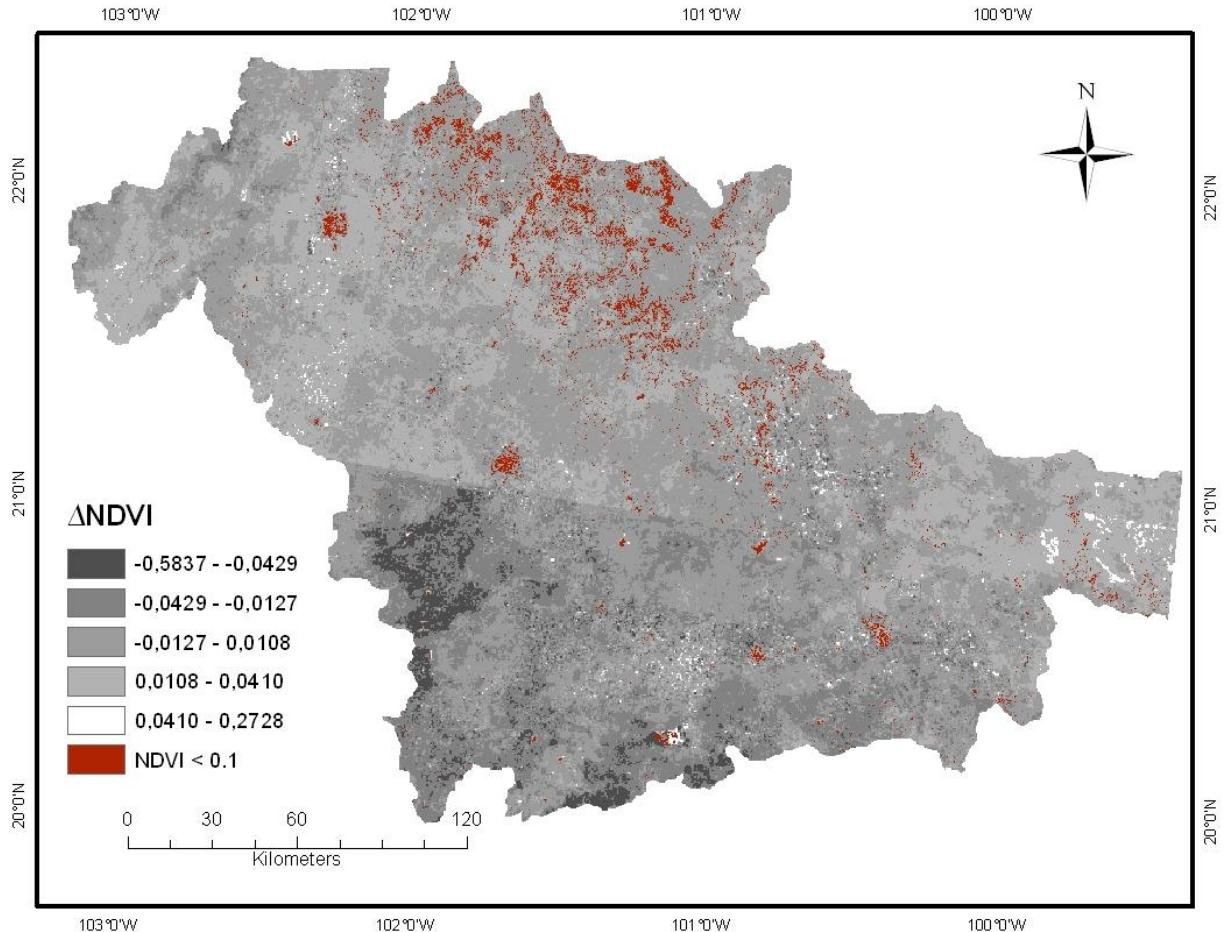


Figura 4.9 Áreas que permanecen sin vegetación a lo largo del periodo de estudio.

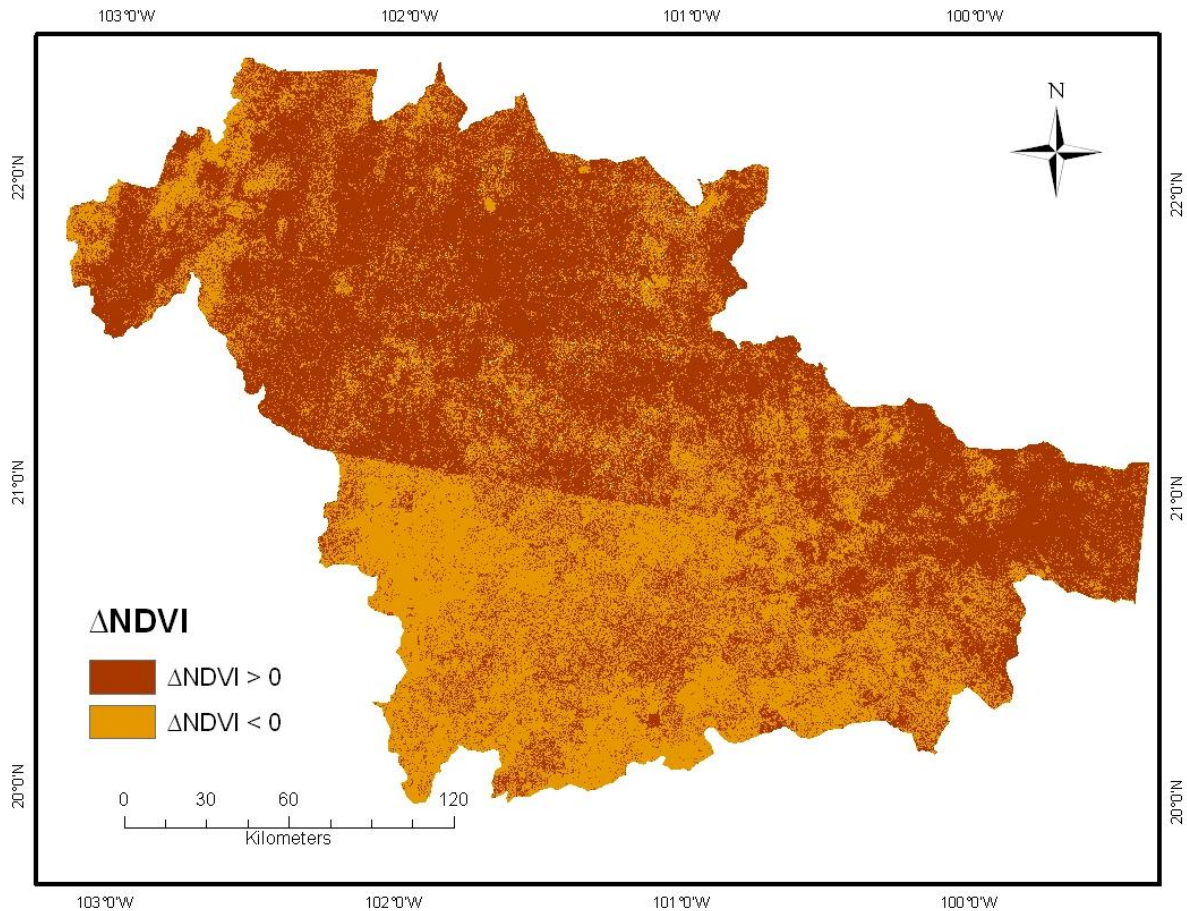


Figura 4.10 Distribución de las zonas con incremento positivo ($\Delta\text{NDVI} > 0$) y negativo ($\Delta\text{NDVI} < 0$) de veredor de la vegetación.

Para analizar los patrones espaciales de cambios en el NDVI se comparó la imagen de tendencias obtenida con el mapa vegetación y uso de suelo del Inventario Nacional Forestal (CONAFOR, 2000).

En las zonas agrícolas, tanto para agricultura de riego como de temporal, las tendencias del NDVI son muy variadas (Figura 4.11). Esto se debe a que el cambio continuo en la cobertura vegetal genera cambios importantes en la respuesta espectral. El aumento o la disminución del NDVI dependen del manejo reflejado en esa época del año, así como de la temperatura y la precipitación.

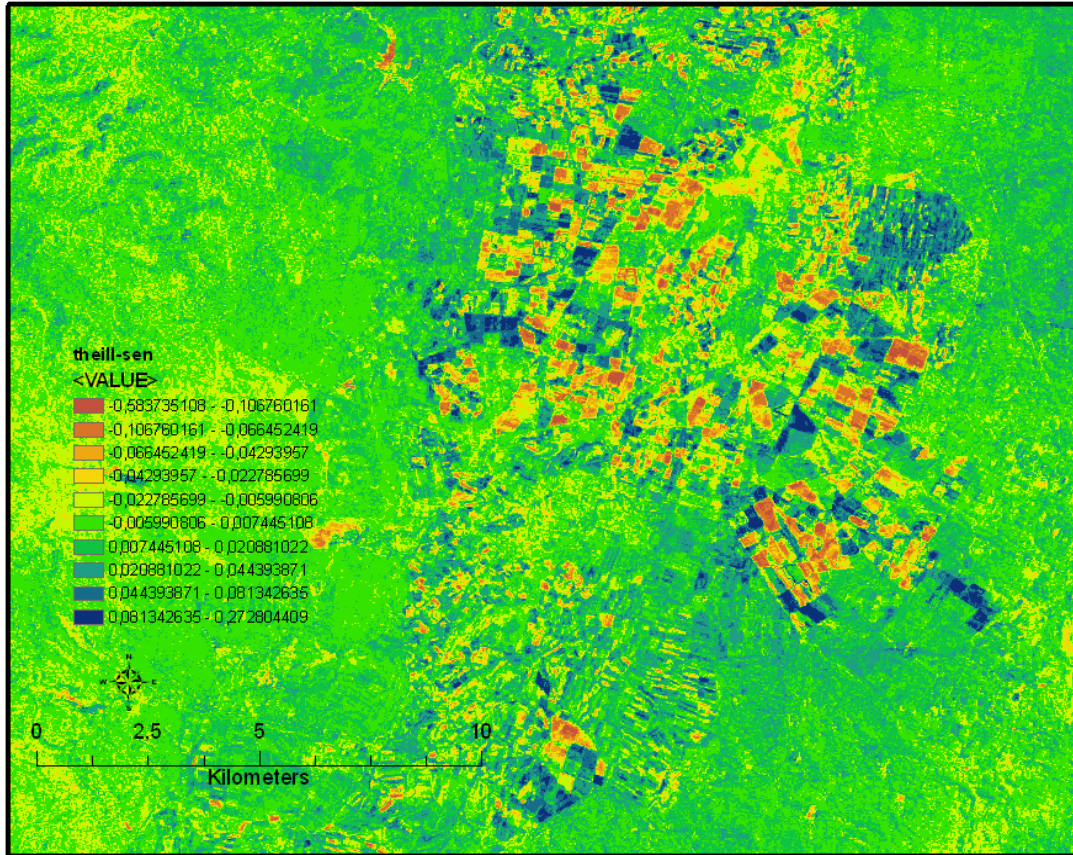


Figura 4.11. Tendencia del NDVI en una zona agrícola al oeste del estado de Guanajuato.

La figura 4.12 muestra una distribución aproximada de los tipos de manejo en la zona agrícola (CONAFOR, 2000). Las zonas agrícolas se encuentran ampliamente distribuidas a lo largo del área de estudio, ocasionando una fragmentación importante en la vegetación natural, principalmente en la parte central, que abarca la región del Altiplano Sur (Figura 4.13). Se observa también una tendencia negativa del NDVI en las zonas circundantes a los principales asentamientos humanos de la región (Querétaro, León, Guanajuato, Silao, Celaya y Aguascalientes).

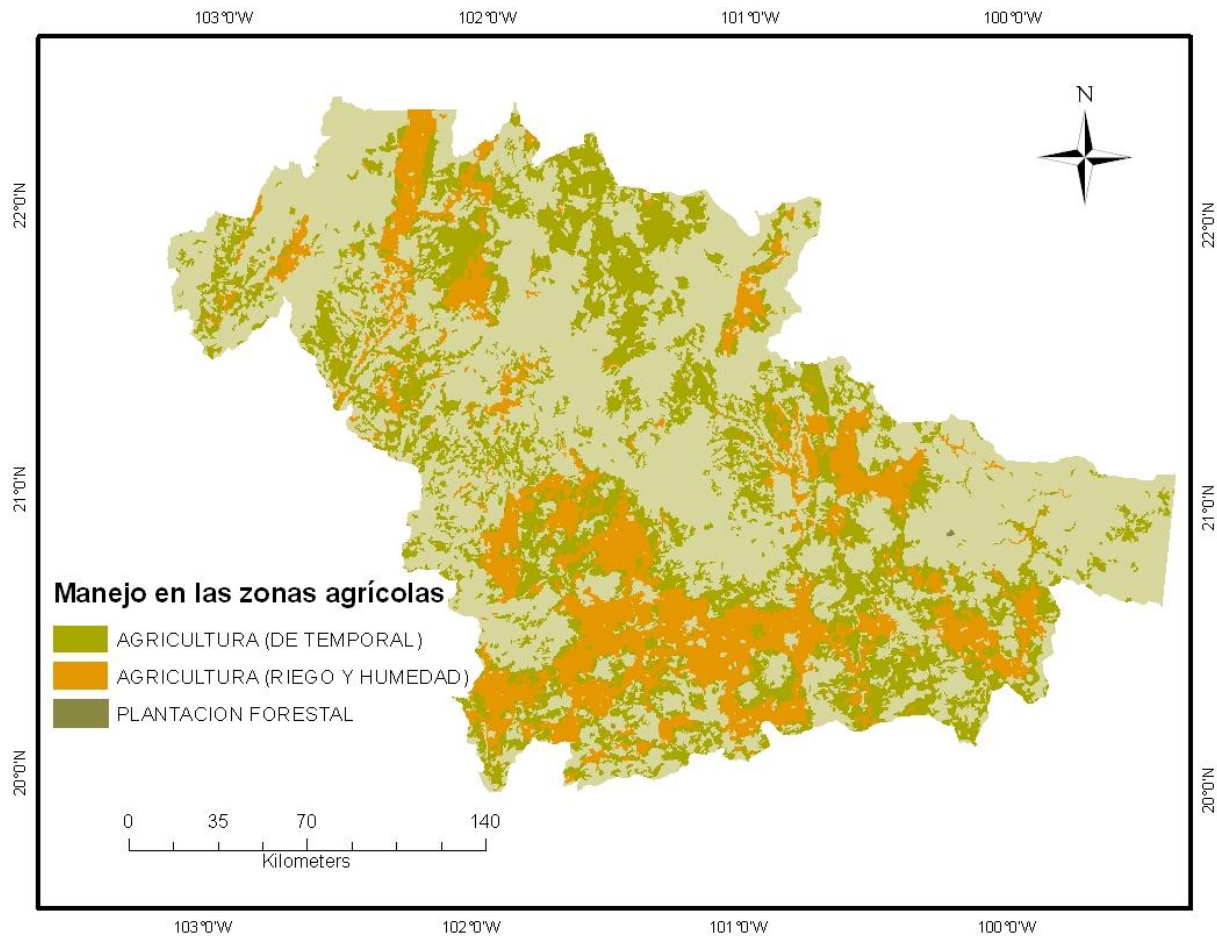


Figura 4.12 Manejo en las zonas agrícolas (CONAFOR, 2000)

Cuadro 4.2. Tendencia del NDVI para los diferentes tipos de vegetación y uso de suelo.

| Tipo de vegetación y uso de suelo | \bar{X} | σ | Mínimo | Máximo |
|-----------------------------------|-----------|----------|-----------|----------|
| Bosque | 0,003325 | 0,0198 | -0,248778 | 0,196671 |
| Selva | -0,003968 | 0,0261 | -0,583735 | 0,210655 |
| Matorral | 0,008471 | 0,0182 | -0,479839 | 0,240608 |
| Pastizal natural | 0,006175 | 0,0160 | -0,337394 | 0,231339 |
| Zonas agrícolas | -0,001542 | 0,0285 | -0,286876 | 0,268728 |

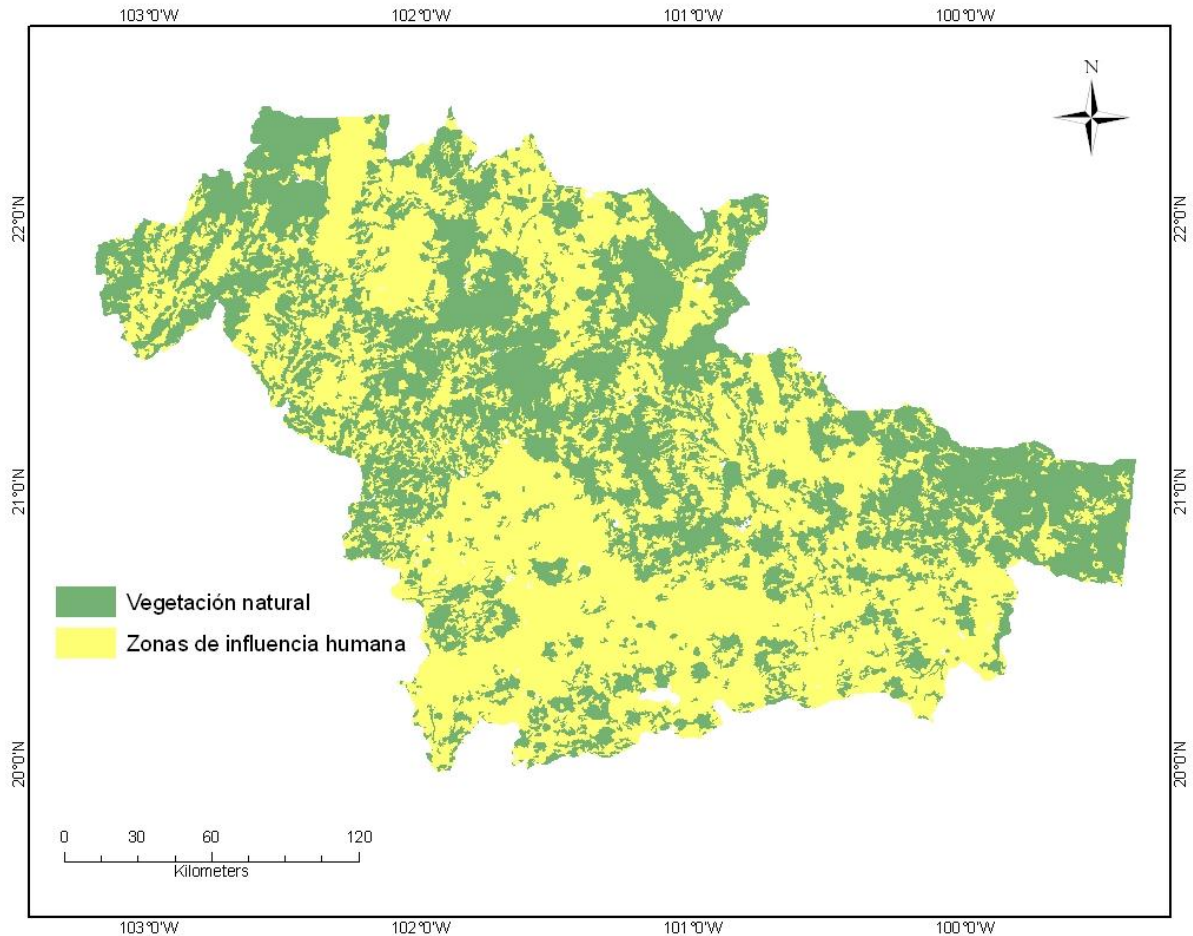


Figura 4.13. Distribución de la zona agrícola y áreas de vegetación natural (CONAFOR, 2000)

Las áreas que aún conservan su vegetación natural se encuentran principalmente distribuidas al Este de la zona de estudio (Figura 4.13), y están comprendidas por pastizal, matorral (incluye huizachal y mezquital), selvas bajas caducifolias y subcaducifolias, y bosques. Los bosques presentan valores de pendiente nulos y positivos en la mayor parte de su distribución. Los cambios negativos del NDVI se localizan norte de la zona de estudio, en la Sierra Occidental, y al sur del estado de Guanajuato, mientras que para los estados de Querétaro e Hidalgo, el Δ NDVI es positivo. Estas tendencias positivas en la zona pueden estar relacionadas con la presencia de las Reservas de la Biosfera de la Sierra Gorda en Querétaro y Guanajuato (Figura 4.14).

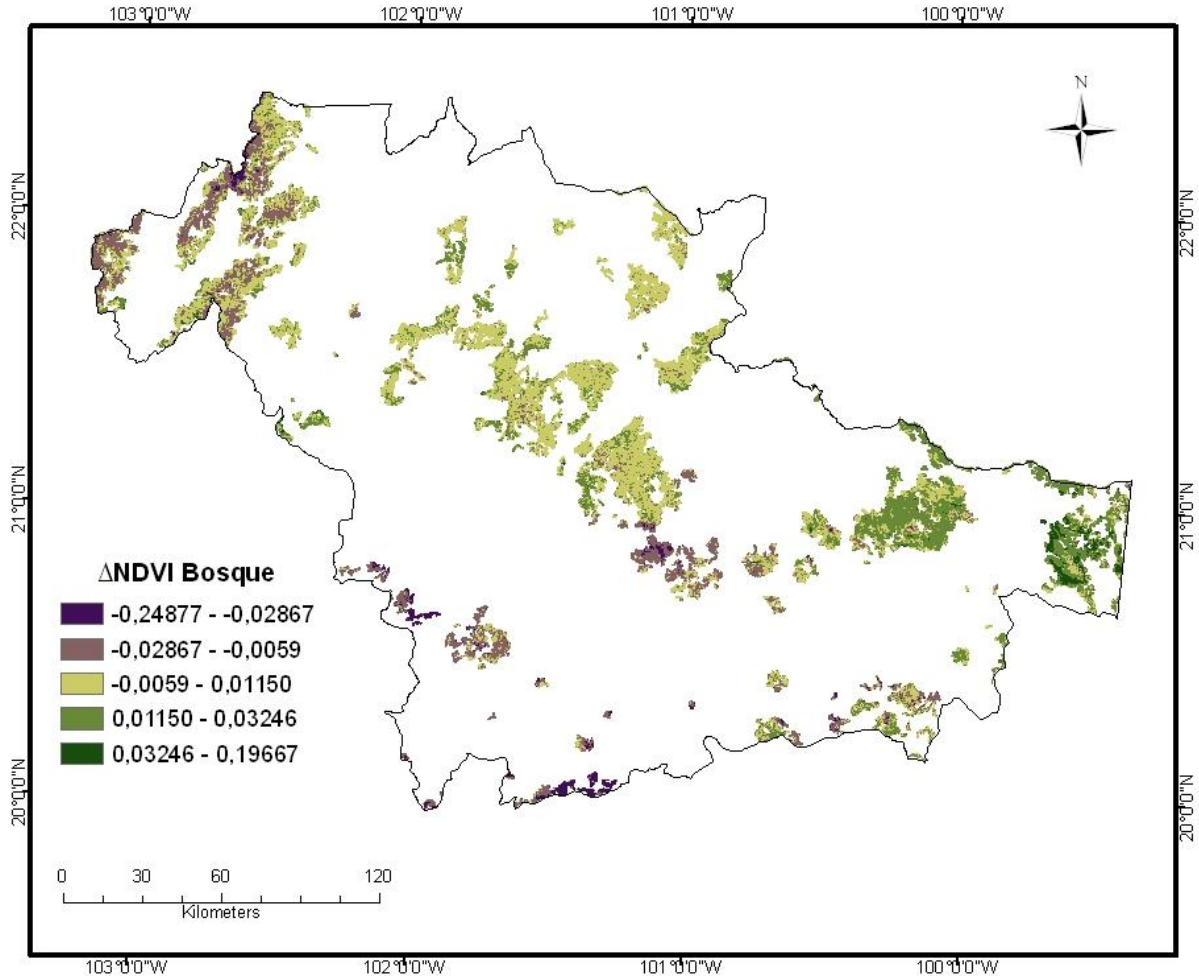


Figura 4.14. Distribución y Δ NDVI para la vegetación de bosque

En el caso de las selvas, compuestas principalmente por matorral subhúmedo, se presentan tendencias positivas y nulas en gran parte de su distribución. Las tendencias negativas se localizan al sur de Guanajuato, norte de Michoacán y en la Sierra Occidental. La zona sur es principalmente agrícola y la vegetación natural se encuentra muy fragmentada debido al cambio de uso de suelo. En este tipo de vegetación es donde se presentan los valores mínimos más extremos (Δ NDVI= -0,58), esto se debe a que la relación lluvia – NDVI es mayor en los tipos de vegetación caducifolia y subcaducifolia que en la vegetación perenne. Las pendientes positivas más pronunciadas se localizan

entre los estados de Hidalgo y Querétaro, al igual que en la Sierra Occidental (Zacatecas y Aguascalientes), y unas áreas en los Altos de Jalisco (Figura 4.15).

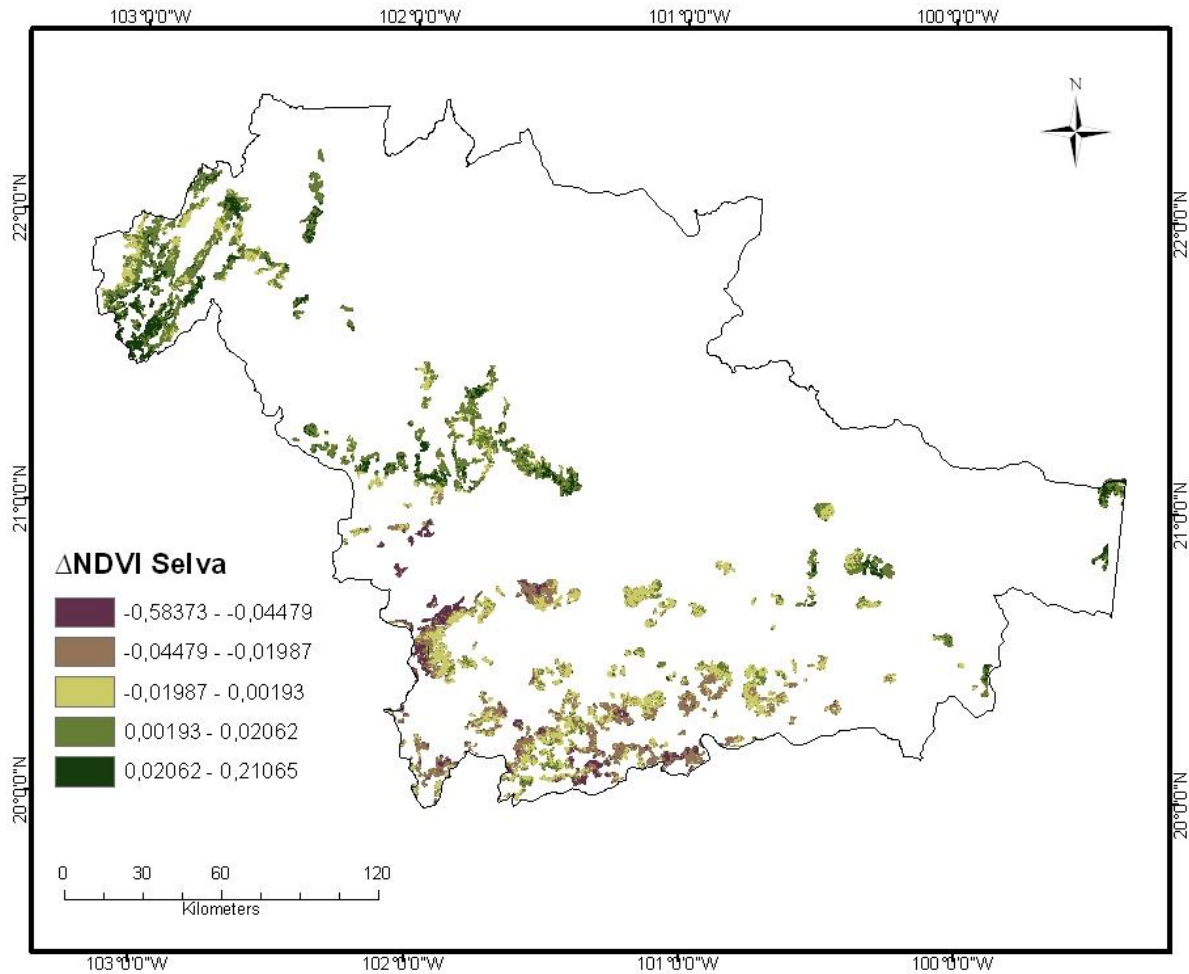


Figura 4.15. Distribución y Δ NDVI para la vegetación de selva caducifolia y subcaducifolias

El matorral xerófilo es el tipo de vegetación más extenso en el país, ocupan aproximadamente 26% del territorio (INEGI, 2005), y se encuentra distribuido en las zonas áridas y semiáridas dentro del área de estudio. Esta vegetación permanece estable y con valores de pendiente positivos en casi toda su distribución, esto puede deberse a que estas zonas, no son muy apropiadas para la agricultura, por lo que no se han visto tan perturbadas por la actividad humana. Los valores de pendiente más bajos se localizan en la parte sureste de

la zona de estudio, en donde se aprecia una mayor fragmentación para este tipo de vegetación (Figura 4.16). Aunque las zonas que registran tendencias negativas son menores, presentan cambios más drásticos. La pérdida de la cubierta vegetal es más severa en ecosistemas de matorral xerófilo que en otros tipos de matorral (Sandoval, 2010).

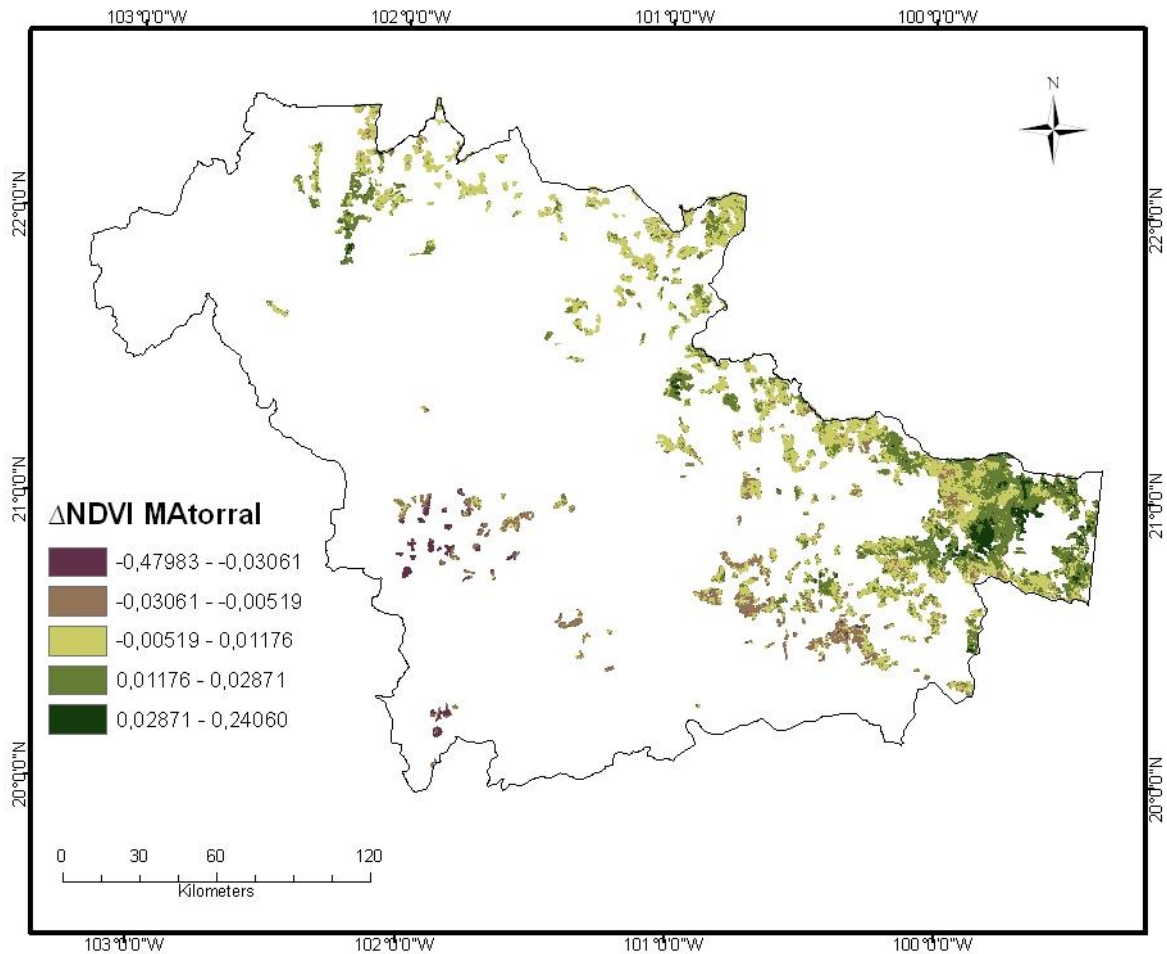


Figura 4.16. Distribución y Δ NDVI para la vegetación de matorral

En el caso de los pastizales, se observan cambios positivos en el NDVI para aproximadamente el 70% de su distribución (Figura 4.17). Sin embargo, las pendientes negativas son mayores que las positivas y se distribuyen cerca de las zonas agrícolas.

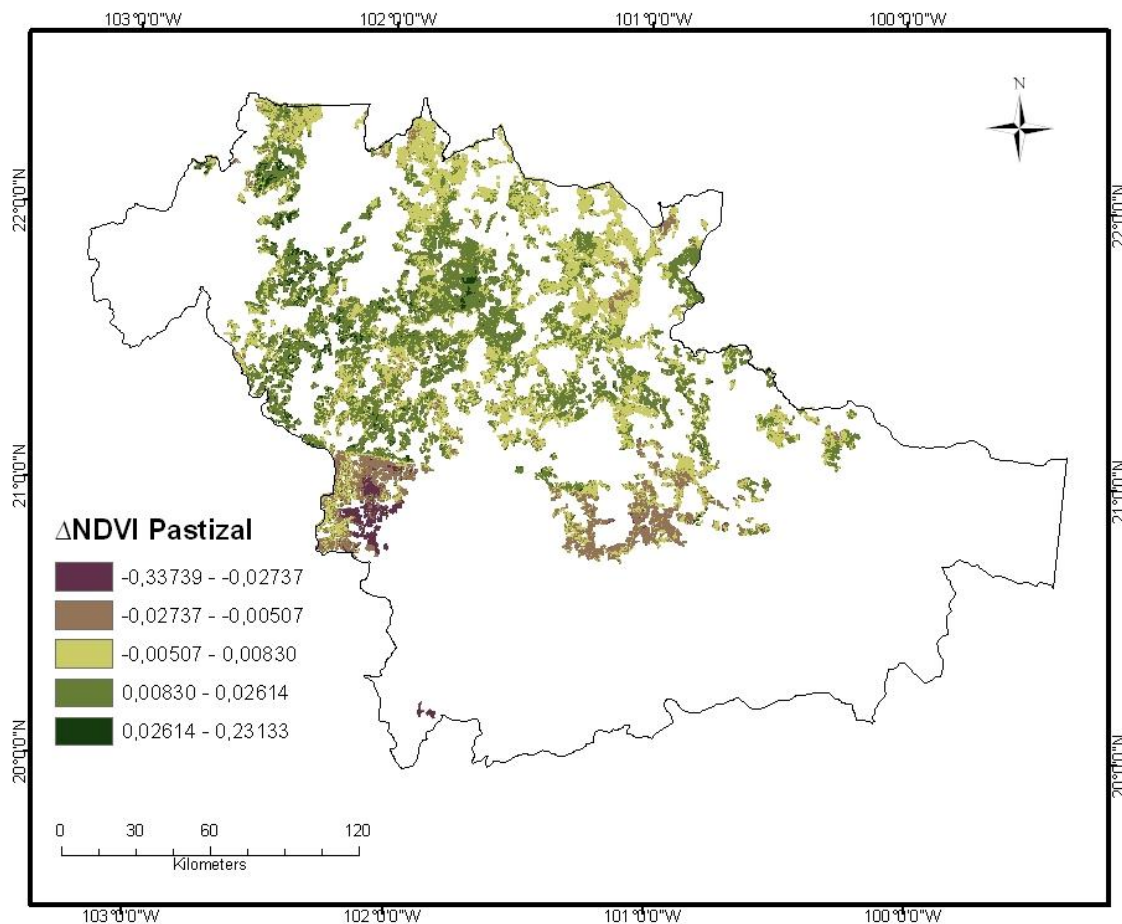


Figura 4.8. Distribución y Δ NDVI para la vegetación de pastizal natural

Es importante monitorear los cambios en la cubierta vegetal pues son un indicador importante del cambio en un sistema ecológico. Estos cambios en la estructura y funcionamiento de un ecosistema pueden tener efectos negativos sobre los servicios ambientales y sobre el aprovechamiento del suelo. En México se contabilizan cerca de 21.7 millones de hectáreas de superficie agrícola y, aunque esta cifra se ha mantenido relativamente constante (SEMARNAT, 2004), el cambio de uso de suelo aún continúa incrementando. Guanajuato se encuentra entre los estados con mayor porcentaje de su superficie ocupada por suelos agrícolas (48%) (SEMARNAT, 2004). Esta expansión de las zonas agrícolas puede provocar cambios importantes en la vegetación natural, no solamente por el cambio de uso de suelo, sino también por efectos de

fragmentación de los ecosistemas, lo que eventualmente puede provocar pérdida de especies tanto vegetales como de fauna, e incrementar la sensibilidad del ecosistema a especies invasoras. Es importante tener en cuenta que la vegetación de las zonas áridas es muy sensible a los cambios de uso de suelo. Aunque no existe una estimación real de la pérdida de matorral, huizachal, mezquital y pastizal natural en las zonas áridas del país, SEMARNAT estima que el 70% de estas zonas se encuentran sobrexplotadas por las actividades de ganadería extensiva, lo que también conduce a la degradación del suelo y eventualmente al proceso de desertificación.

V. CONCLUSIONES

El uso de la teledetección y los sistemas de información geográfica para el estudio de la cobertura vegetal es de gran utilidad cuando se trata de evaluar cambios en áreas muy extensas como en este caso. Además la información que proporcionan los sensores satelitales permite evaluar características fenológicas de la vegetación de manera precisa y gran escala. La resolución de las imágenes Landsat TM resultó adecuada para discriminar entre las diferentes coberturas vegetales e identificar tendencias temporales específicas de cada una.

De manera general, se observó un incremento en los valores del NDVI en la mayor parte del área de estudio, pero los valores de pendiente negativos que se obtuvieron muestran que en las zonas donde ocurrieron tendencias negativas del NDVI los cambios fueron más intensos. Discriminando entre las coberturas vegetales, la selva caducifolia y subcaducifolia mostró mayores valores de tendencia negativos, mientras que la vegetación de bosque se mantiene más constante en cuanto a su valor de NDVI a lo largo del periodo. En matorral xerófilo y pastizales, las pendientes negativas son más pronunciadas, sin embargo, la variación entre pendientes positivas y negativas no es muy marcada. Se aprecia una disminución anual en los cuerpos de agua más grandes de la zona, entre ello la laguna de Yuriria en Guanajuato.

Sería conveniente contar con una serie temporal más larga y una mayor disposición de imágenes que permitiera reducir el rango de meses para obtener un análisis más preciso de las tendencias temporales. El estimador Theil-Sen permite identificar tendencias temporales del NDVI, sin embargo no aporta información sobre los factores que influyen en estas tendencias. Sería conveniente realizar un análisis que incluya variables climáticas para determinar cuales tienen mayor influencia sobre las variaciones del NDVI en la zona. Este estudio proporciona una base para analizar los cambios fenológicos que han ocurrido en la vegetación de la zona central del país en las últimas dos décadas,

así como también una herramienta para la predicción de tendencias y localización de fenómenos como la desertificación.

LITERATURA CITADA

- Alatorre L.C. y S. Beguería. 2010. Analysis of spatial and temporal evolution of the NDVI on vegetated and degraded areas in the Central Spanish Pyrenees.
- Alcaraz-Segura, D., G. Baldi, P. Durante, M.F. Garbulsky. 2008. Análisis de la dinámica temporal del NDVI en áreas protegidas: tres casos de estudio a distintas escalas espaciales, temporales y de gestión.
- Bai, Z.G. y D.L. Dent. 2006. Global assessment of land degradation and improvement: pilot study in Kenya. Report 2006/01, ISRIC – World Soil Information, Wageningen.
- Butzer, K.W. y E.K. Butzer. 1997. The natural vegetation of the Mexican Bajío: archival documentation of a 16th century savanna environment. Quaternary International, Vol. 43/44, pp. 161.
- Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO). 1998. 'Climas' (clasificación de Köppen, modificado por García). Escala 1:1000000. México.
- Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO). 1998. 'Subcuencas hidrológicas'. Extraído de Boletín hidrológico. (1970). Subcuencas hidrológicas en Mapas de regiones hidrológicas. Escala 1:1000000. México.
- Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO). 1997. 'Provincias biogeográficas de México'. Escala 1:4 000 000. México.
- Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO), (1998). 'Curvas de nivel para la República Mexicana'. Escala 1:250000. Extraído del Modelo Digital del Terreno. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEG). México.
- Comisión Nacional Forestal (CONAFOR). 2000. Inventario Nacional Forestal y Suelo.
- Carranza, G.E. 2005. Conocimiento actual de la flora y la diversidad vegetal del estado de Guanajuato, México. Flora del bajo y de regiones adyacentes. Fascículo complementario XXI

- De Beurs, K.M. y G.M. Henebry. 2003. Land surface phenology, climatic variation, and institutional change: Analyzing agricultural land cover change in Kazakhstan. *Remote Sensing of Environment* 89 (2004) 497–509
- Dedios, M.N. 2009. Análisis espacial del comportamiento fenológico de la vegetación en la cuenca del río Chira usando imágenes de alta resolución espectral. *Revista Peruana Geo-Atmosférica RPGA (1)*, 20-34
- Fernandes, R. y S.G. Leblanc. 2005. Parametric (modified least squares) and non-parametric (Theil–Sen) linear regressions for predicting biophysical parameters in the presence of measurement errors. *Remote Sensing of Environment* Vol. 95
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI) e Instituto Nacional de Ecología (INE). 2000. Indicadores de Desarrollo Sustentable en México. México.
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). 2005. Carta de uso actual del suelo y vegetación serie III. México.
- Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (INEGI), Instituto Nacional de Ecología (INE), Comisión Nacional de Agua (CONAGUA). 2007. 'Mapa de Cuencas Hidrográficas de México, 2007'. Escala 1:250000. México.
- Jiménez, M.N., J.C. Jiménez Sánchez y J. Azorín Amorós. 2009. Impacto de la sequía en la vegetación natural. Curso de Especialista en Teledetección y S.I.G X Edición 2009-2010
- Julien, Y. 2008. Vegetation monitoring through retrieval of NDVI and LST time series from historical databases. Tesis de Doctorado. Universitat de València
- Liang, X; A. Samanta; M.H. Costa; S. Ganguly; R.R. Nemani y R.B. Myneni. 2011. Widespread decline in greenness of Amazonian vegetation due to the 2010 drought. *Geophysical Research Letters*, Vol. 38, L07402
- Levin, N. 1999. Fundamentals of Remote Sensing. Hydrographic Data Management course, IMO - International Maritime Academy, Trieste, Italia.
- Madrigal-Gómez, J. M. y A. López-Caloca. 2010. Propuesta de un modelo de desertificación utilizando imágenes multiespectrales en Cuatrociénegas, Coahuila, México”. XIV Simposio Internacional SELPER. Guanajuato, México.

- Manrique, E.G. 1999. Índice de vegetación. Aplicación del NDVI. Teledetección. Avances y Aplicaciones. VIII Congreso Nacional de Teledetección. Albacete, España.
- Nieto-Samaniego, A.F., S.A. Alaniz-Álvarez, A.C. Cano. 2005. La Mesa Central de México: estratigrafía, estructura y evolución tectónica cenozoica. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana. Volumen Conmemorativo del Centenario. Temas Selectos de la Geología Mexicana. Tomo LVII, núm. 3
- Oropeza, O. 2004. Evaluación de la vulnerabilidad a la desertificación. Cambio climático: una visión desde México. Publicación del Instituto Nacional de Ecología y Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales. México, D.F.
- Riaño D., E. Chuvieco, S. Ustin, R. Zomer, P. Dennison, D. Roberts y J. Salas. 2002. Assessment of vegetation regeneration after fire through multitemporal analysis of AVIRIS images in the Santa Monica Mountains. Remote Sensing of Environment 79, p. 60– 71.
- Rouse, J.W., R.H. Hass, J.A. Schell, D.W. Deering y J.C. Harlan. 1974. Monitoring the vernal advancement and retrogradation (greenwave effect) of natural vegetation. NASA/GSFC Greenbelt, M.D.
- Sandoval, P.E. 2010. Patrones de variación espacio- temporal de matorral xerófilo en la subcuenca de Zapotitlán, Puebla. Tesis de Maestría. Universidad Autónoma Metropolitana
- SEMARNAT. Dirección General de Gestión Forestal y de Suelos. México. 2004.
- Soria, R.J. y R.R. Granados. 2005. Relación entre los índices de vegetación obtenidos de los sensores AHVRR del satélite NOAA y TM de Landsat. Ciencia *Ergo sum*. Vol. 12. Núm. 002. Toluca, México.
- Tucker C.J. y P. J. Sellers. 1986. Satellite remote sensing of primary production, International Journal of Remote Sensing, 7:11, 1395-1416

APÉNDICE

Apéndice 1. Relación de las escenas utilizadas en el estudio

| Escena | Fecha | Escena | Fecha |
|-------------|--------|-------------|--------|
| p27r45 1993 | NOV-12 | p28r45 1993 | OCT-02 |
| p27r45 1994 | SEP-28 | p28r45 1994 | NOV-22 |
| p27r45 1997 | OCT-22 | p28r45 1997 | SEP-27 |
| p27r45 1999 | OCT-28 | p28r45 1999 | NOV-4 |
| p27r45 2000 | OCT-30 | p28r45 2000 | NOV-22 |
| p27r45 2009 | NOV-24 | p28r45 2009 | NOV-12 |
| p27r46 1993 | OCT-11 | p28r46 1993 | NOV-19 |
| p27r46 1994 | SEP-28 | p28r46 1994 | NOV-22 |
| p27r46 1997 | OCT-22 | p28r46 1997 | SEP-27 |
| p27r46 1999 | OCT-28 | p28r46 1999 | NOV-04 |
| p27r46 2000 | OCT-30 | p28r46 2000 | AGO-18 |
| p27r46 2009 | NOV-24 | p28r46 2009 | NOV-17 |
| p28r44 1993 | OCT-02 | P29r45 1993 | NOV-10 |
| p28r44 1994 | OCT-21 | P29r45 1994 | OCT-28 |
| p28r44 1997 | OCT-20 | P29r45 1997 | OCT-20 |
| p28r44 1999 | OCT-03 | P29r45 1999 | OCT-26 |
| p28r44 2000 | NOV-22 | P29r45 2000 | AGO-10 |
| p28r44 2009 | NOV-15 | P29r45 2009 | OCT-19 |