



# UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

---

---

## FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES ZARAGOZA

EVALUACIÓN DE LA RESPUESTA MULTIESPECTRAL DE LA  
VEGETACIÓN XERÓFILA POR MEDIO DE DIFERENTES IMÁGENES  
SATELITALES PARA LA REGIÓN DE LA COMARCA LAGUNERA MÉXICO.

### TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

**BIÓLOGO**

PRESENTA:

**JAVIER EDUARDO CASTILLO LÓPEZ**

Directora de Tesis: M. en C. Gabriela Gómez Rodríguez

Asesora Interna: Dra. Rosalva García Sánchez



México D.F. Abril 2013



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

*"No es la especie más fuerte la que sobrevive, ni la más  
inteligente, sino la que responde mejor al cambio..."*

*(1809-1882) Charles Darwin Naturalista inglés.*

## AGRADECIMIENTOS

Es un verdadero placer ocupar este espacio para poder expresar mis más sinceros agradecimientos a:

En primer lugar a la vida por haberme dado la oportunidad de disfrutar de todos los momentos y en especial por ver realizada esta meta.

A la máxima casa de estudio, la Universidad Nacional Autónoma de México por darme la oportunidad de cumplir con uno de mis mayores sueños, formar parte de ella y tener así una profesión noble y con ello una mejor calidad de vida, llevándola tatuada en el alma.

A mí estimada Facultad de Estudios Superiores Zaragoza de la que me siento orgulloso de formar parte.

A la carrera de Biología por todo el apoyo recibido durante mi estancia y hacer de mí una persona consiente de las necesidades que envuelven al país.

A todos y cada uno de mis queridos profesores que influyeron en mi formación académica en esta honorable Facultad.

Al instituto de Geografía de la Universidad Nacional Autónoma de México (a sus académicos, administrativos, técnicos y becarios) por haberme brindado la oportunidad de realizarme en el ámbito profesional.

Quiero expresar también de manera especial y sincera, mis agradecimientos a la M. en C. Gabriela Gómez Rodríguez, por haberme recibido en el Laboratorio de Sistemas de Información Geográfica y Percepción Remota del Instituto de Geografía, brindándome la confianza y el apoyo para realizar desde el servicio social y el desarrollo de la presente

tesis, hasta capacitaciones, diplomados, talleres, adquiriendo así experiencia laboral, siendo una de las mejores etapas de mi vida.

Expreso mi agradecimiento al Dr. Roberto Bonifaz Alonzo, por haberme brindado gran parte de su tiempo, paciencia e invaluable enseñanza.

Debo agradecer de una manera muy sincera al M. en C. Eliseo Cantellano de Rosas, que de él y al Laboratorio de Geomática obtuve el gusto y los primeros conocimientos que me llevaron a querer dedicarme a esta increíble disciplina.

Quiero también expresar mis más sinceros agradecimientos a mi asesora la Dra. Rosalva García Sánchez por su paciencia, comprensión, apoyo, consejos, aportes y participación entusiasta en el desarrollo de esta tesis.

Agradezco de manera profunda la asesoría, consejos, revisiones, aportes y su invaluable apoyo a la M. en C. Ma. Beatriz Martínez Rosales para la culminación de esta tesis.

Expreso mis agradecimientos al M. en G. Mauricio René Ramos Álvarez, del Laboratorio de Análisis GeoEspacial del Instituto de Geografía de la UNAM, por sus enseñanzas en el manejo de las imágenes satelitales y apoyo desde que llegué al LAGE.

Mis más sinceros agradecimientos al Dr. Jorge Prado, al Dr. Raúl Aguirre y al M. en I Marco Antonio López Vega del Laboratorio de Análisis GeoEspacial del Instituto de Geografía de la UNAM, por todo el apoyo que recibí desde mis primeros días en el LAGE.

A cada uno de los miembros del jurado, M. en C. Manuel Faustino Rico Bernal, Dra. Rosalva García Sánchez, M. en C. Gabriela Gómez Rodríguez, M. en C. Eliseo Cantellano de Rosas y a la M. en C. Ma. Beatriz Martínez Rosales por su tiempo invertido durante la revisión y sus valiosas aportaciones para el mejoramiento de este trabajo.

De igual manera expreso mi agradecimiento al M en C. Vladimir Pliego, por permitirme tomar el tiempo necesario para realizar los trámites concluyendo así mi tesis.

Agradezco sincera e infinitamente el apoyo brindado a la Bióloga Rocío Montiel Bustos, por haberme apoyado y de esta manera haber concluido este sueño y sobre todo por la confianza depositada.

También quiero expresar mis agradecimientos a todos mis amigos entrañables con los que viví numerables aventuras a: un gran amigo del alma, el Pareja, a Paco, amigos del LAGE a Roger, él buen Oswaldo, Marco, Pepé, Laurita, Miriam, Maye, Ana, Ranitas, Armando, Beto, Charly, Olivia, Alex, Fer, Juanito, Web-Master, Lulú, Dr. Aguirre, al querido Doc. George por todos sus consejos, a no podían faltar los de la fuerza rosa del LAGE: Moe de Samayoa, al Barbón, la Pau y hasta el Muñeco, solo por mencionar algunos amigos de la Facultad: Wil, Chupadedo-Vader, la Loba, Anita, al Donas, Juanito Cano, a la Pelota, los Coyotes, Edith, Mireya la bella, el Rodo, mis amigos de QFB, Jalena, Güera, Mono, Perlita ¡ups! son muchos... y a todos aquellos que estuvieron conmigo en algún momento de la vida.

## DEDICATORIA

A mi querida familia

Que son aquellos que han creído en mí sin importar nada y hoy les da un inmenso orgullo el saber que he concluido esta etapa de mi vida y continuar creciendo. A mis entrañables hermanos, a mi querida e inolvidable hermana, a mis queridas tías, a mis amados abuelitos, a mis latosos y amados sobrinos y sobre todo a mis admirables y queridos padres, quienes han sacrificado gran parte de su vida para formarme, educarme y hacerme una persona útil, mostrándome que con honestidad, perseverancia, responsabilidad y humildad se pueden lograr las más difíciles metas de la vida.

A una mujer extraordinaria que admiro profundamente por su gran tenacidad y perseverancia, siendo una invaluable compañera en los últimos años de mi vida, gracias por todos esos consejos y sobre todo por el apoyo incondicional que una mujer puede dar. Sobre todo que le da una chispa a mi ácida existencia: a ¡Wamba! Jessica S. Sánchez Flores y también a su apreciada familia y hasta su ¡shasha!; por el afecto, la confianza, la hospitalidad y todo el apoyo brindado durante estos últimos años.

A mis amigos de la vida

Rafael Castillo Montiel y a su esposa Gabriela Alfonso por el extraordinario ejemplo de superar los retos, consejos y apoyo, René Arturo Mandujano Hurtado y Luis Samayoa Navarrete por ser unos grandes amigos, por los días de trabajo y las noches, ¡también de trabajo y días de relajo!, a sus queridas familias que se han convertido al paso del tiempo en grandiosos amigos, a Don René por su gran sentido de humor, sus consejos de vida y hasta ¡por sus regaños, Por qué no?; al Sr. y Sra. Samayoa ¡Pr fin! ¡Misión cumplida! tarde pero seguro... gracias por su gran afecto, hospitalidad, generosidad y consejos, también por esos deliciosos ¡mega-sándwiches! que nos reanimaron una y otra vez en todas

nuestras aventuras en campo, al Sr. Víctor Zamayoa por sus consejos y esas primeras oportunidades para laborar en la vida profesional, a mi querido compañero y amigo del alma; Francisco Javier Esparza Alarcón y su nueva familia; al igual que mis estimados amigos Daniel Lovera Alcántara y Ana Ortiz Vollbert y su esperado bebé.

*Javier Eduardo Castillo López*

**“Por mi Raza Hablará el Espíritu”**

# Índice

RESUMEN .....	1
INTRODUCCIÓN.....	2
I. MARCO TEÓRICO.....	4
1.1. Zonas áridas y semiáridas de México.....	5
1.2. La Comarca Lagunera .....	7
1.3. La flora de la Comarca Lagunera .....	8
1.4. Percepción remota .....	9
1.4.1. Percepción remota y vegetación.....	9
1.4.2. Constitución física de la hoja y su reflectividad espectral .....	10
1.5. Espectro electromagnético.....	11
1.6. Resolución de los sensores remotos .....	13
1.7. Imágenes de satélite.....	14
1.7.1. Imágenes del satélite LANDSAT 7 ETM + .....	15
1.7.2. Imágenes del satélite MODIS.....	16
1.8. Interpretación de imágenes de satélites .....	17
1.8.1. Principales elementos de interpretación visual.....	18
1.8.2. Interpretación digital de las imágenes .....	20
1.9. Composición RGB.....	21
1.10. Índices de vegetación.....	21
1.10.1. NDVI .....	23
1.10.2. SAVI.....	24
1.11. Sistemas de Información Geográfica.....	26
II. JUSTIFICACIÓN .....	27
III. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	29

IV. HIPÓTESIS .....	29
V. OBJETIVOS .....	29
5.1. General.....	29
5.2. Objetivos particulares .....	30
VII. MATERIALES y MÉTODOS .....	31
7.1. Zona de estudio.....	31
7.2. Fase de gabinete.....	34
7.2.1. Obtención de imágenes satelitales .....	34
7.2.2. Procesamiento de las imágenes satelitales.....	36
7.2.3 Obtención de firmas espectrales .....	41
7.2.4. Cálculo de los índices de vegetación .....	43
7.3. Fase de campo .....	45
7.3.1. Identificación fisionómica de la cobertura vegetal.....	46
VIII. RESULTADOS .....	47
IX. ANÁLISIS y DISCUSIÓN .....	78
X CONCLUSIONES .....	84
XI. RECOMENDACIONES .....	86
XI. BIBLIOGRAFÍA CITADA.....	87
ANEXO I.....	91
ANEXO I.....	95

## Índice de Figuras

Figura 1. Distribución de las zonas secas en México. Fuente: <a href="http://www.semarnat.gob.mx/">http://www.semarnat.gob.mx/</a> .....	5
Figura 2. Espectro Electromagnético Fuente: <a href="http://www.astrored.org.">http://www.astrored.org.</a> ....	11
Figura 3. Diagrama de la combinación de las bandas 2, 3 y 4 de una imagen LANDSAT 7 ETM +, para resaltar la vegetación del suelo.....	21
Figura 4. Firma espectral de la Vegetación. ....	22
Figura 5. Visualización de un sistema de información geográfica (SIG).....	26
Figura 6. Localización del área de estudio. ....	32
Figura 7. Path, Row del satélite LANDSAT 7 ETM +, correspondientes a la Comarca Lagunera. ....	35
Figura 8. Portal del Sistema Geológico de los Estados Unidos (USGS), acceso libre a diferentes imágenes satelitales. ....	36
Figura 9. Edición del encabezado y despliegue de la imagen ETM3143BZ13 en el software ENVI 4.8. ....	37
Figura 10. Procesamiento de las imágenes para conformar el mosaico de la zona de estudio. .....	38
Figura 11. Obtención de mosaico y compuesto 321 RGB con el despliegue del polígono de la zona de estudio. ....	38
Figura 12. Compuesto 321 RGB y corte del mosaico LANDSAT 7 ETM +.....	39
Figura 13. Compuesto de falso color en imagen MODIS con proyección sinusoidal. ....	40
Figura 14. Compuesto de falso color en imagen MODIS con conversión al sistema de coordenadas geográficas, mostrando la sobre posición del polígono que comprende a la zona de estudio. ....	40
Figura 15. Compuesto de falso color 432 en imagen MODIS con la delimitación de la zona de estudio. ....	41
Figura 16. Perfiles espectrales de la vegetación en la imagen LANDSAT 7 ETM + y MODIS-TERRA. ....	42

Figura 17. Vegetación detectada a través del módulo <i>Vegetation Delineation and Stress Detection</i> .....	43
Figura 18. Cálculo de los índices NDVI y SAVI mediante el software ENVI 4.8. ....	45
Figura 19. Compuesto RGB 321, sensor LANDSAT 7 ETM +.....	47
Figura 20. Compuesto RGB 432, sensor LANDSAT 7 ETM +.....	47
Figura 21. Compuesto RGB432, sensor MODIS-TERRA.....	47
Figura 22. Firmas espectrales de la vegetación en la imagen satelital LANDSAT 7 ETM +. .....	48
Figura 23. Firmas espectrales de la vegetación en la imagen satelital MODIS-TERRA.....	49
Figura 24. Mapa de la delineación de la vegetación de LANDSAT 7 ETM +. ....	50
Figura 25. NDVI con LANDSAT 7 ETM +.....	51
Figura 26. NDVI con MODIS-TERRA.....	51
Figura 27. Producto SAVI con factor $l$ de 0.5 en LANDSAT 7 ETM +.....	52
Figura 28. Producto SAVI con factor $l$ de 0.5 en MODIS-TERRA.....	52
Figura 29. Producto SAVI con factor $l$ de 0.75 en LANDSAT 7 ETM +.....	52
Figura 30. Producto SAVI con factor $l$ de 0.75 en MODIS-TERRA.....	52
Figura 31. Producto SAVI con factor $l$ de 1.0 de LANDSAT 7 ETM +.....	53
Figura 32. Producto SAVI con factor $l$ de 1.0 en MODIS-TERRA.....	53
Figura 33. Valores espectrales de los índices de vegetación en LANDSAT 7 ETM +.....	55
Figura 34. Valores espectrales de los índices de vegetación en MODIS-TERRA.....	56
Figura 35. Valores del NDVI en los puntos de caracterización para cada imagen satelital.	60
Figura 36. Valores del SAVI con factor $l$ de 0.5 en los puntos de caracterización para cada imagen satelital. ....	60
Figura 37. Valores del SAVI con factor $l$ de 0.75 en los puntos de caracterización para cada imagen satelital. ....	61
Figura 38. Valores del SAVI con factor $l$ de 1.0 en los puntos de caracterización para cada imagen satelital. ....	61
Figura 39. Índices de vegetación para cada punto de caracterización fisionómica aplicada en las imágenes satelitales. ....	62
Figura 40. Mapa de puntos de caracterización fisionómica en la Comarca Lagunera. ....	63
Figura 41. Punto 1 de caracterización fisionómica en los límites de Matamoros y Viesca.	70

Figura 42. Punto 2 de caracterización fisionómica en las dunas de Bilbao, Viesca.....	70
Figura 43. Punto 3 de caracterización fisionómica en la laguna de Mayrán Coahuila.....	70
Figura 44. Punto 4 de caracterización fisionómica Coahuila. ....	71
Figura 45. Punto 5 de caracterización fisionómica entre los límites entre las rancherías del Diamante y San Agustín en Ceballos Mapimí Durango. ....	71
Figura 46. Punto 6 de caracterización fisionómica entre los límites de la Reserva de la Biosfera de Mapimí.....	71
Figura 47. Punto 7 de caracterización fisionómica, en la localidad de Bermejillo Durango. .....	72
Figura 48. Punto 8 de caracterización fisionómica, en la localidad de Mapimí Durango....	72
Figura 49. Punto 9 de caracterización fisionómica, en la localidad de Ojuela Durango.....	72
Figura 50. Punto 10 de caracterización fisionómica en la localidad del Diamante Durango. .....	73
Figura 51. Punto 11 de caracterización fisionómica en el municipio de Tlalhuilio Durango. .....	73
Figura 52. Punto 12 de caracterización fisionómica en la localidad de Vicente Suárez Durango.....	73
Figura 53. Punto 13 de caracterización fisionómica San Luis Cordero Durango. ....	74
Figura 54. Punto 14 de caracterización fisionómica en el municipio de Nazas Durango. ...	74
Figura 55. Punto 15 de caracterización fisionómica en el municipio de San Pedro Gallo Durango.....	74
Figura 56. Punto 16 de caracterización fisionómica en el municipio del Rodeo Durango. .	75
Figura 57. Punto 17 de caracterización fisionómica cerca del rio Nazas Durango. ....	75
Figura 58. Punto 18 de caracterización fisionómica en el municipio de Cuencáme Durango. .....	75
Figura 59. Desarrollo del Sistema de Información Geográfica (SIG), generado en ArcGis 9.3.....	76

## Índice de Tablas

Tabla 1. Comunidades vegetales del Desierto Chihuahuense con sus especies más características.....	7
Tabla 2. Características espectrales de los sensores remotos. ....	16
Tabla 3. Adquisición de imágenes LANDSAT 7 ETM +. ....	34
Tabla 4. Estadística básica del índice de vegetación NDVI. ....	53
Tabla 5. Estadística básica del índice de vegetación SAVI con factor $l$ de 0.5.....	54
Tabla 6. Estadística básica del índice de vegetación SAVI con factor $l$ de 0.75.....	54
Tabla 7. Estadística básica del índice de vegetación SAVI con factor $l$ de 1.0.....	54
Tabla 8. Valores espectrales de los índices de vegetación en LANDSAT 7 ETM +. ....	55
Tabla 9. Valores espectrales de los índices de vegetación en MODIS-TERRA. ....	56
Tabla 10. Valores espectrales de los índices de vegetación en los puntos de caracterización fisionómica. ....	58
Tabla 11. Metadatos de la imagen ETM3141BZ13. ....	91
Tabla 12. Metadatos de la imagen ETM3142BZ13. ....	91
Tabla 13. Metadatos de la imagen ETM3143BZ13. ....	92
Tabla 14. Metadatos de la imagen ETM3041BZ13. ....	92
Tabla 15. Metadatos de la imagen ETM3042BZ13. ....	93
Tabla 16. Metadatos de la imagen ETM3043BZ13. ....	93
Tabla 17. Metadatos de la imagen ETM2942BZ13. ....	94
Tabla 18. Metadatos de la imagen ETM2943BZ13. ....	94
Tabla 19. Formato de caracterización fisionómica.....	95



## RESUMEN

El presente trabajo aborda el análisis sobre el comportamiento espectral de la vegetación xerófila de la región de la Comarca Lagunera, que representa un hábitat semidesértico, lacustre hoy desecado, ubicado en el centro-norte del Altiplano Mexicano, dentro de la región biogeográfica conocida como Desierto Chihuahuense y en la confluencia de los estados de Coahuila y Durango, las condiciones naturales son en apariencia inhóspitas, ya que oscilan entre aridez y semiaridez. Aplicando técnicas de percepción remota y utilizando imágenes satelitales como MODIS-TERRA y LANSAT 7 ETM + realizando un análisis comparativo entre la combinación de bandas espectrales, compuestos RGB y la aplicación de índices de vegetación NDVI siendo utilizado como un indicador de biomasa y el índice de vegetación SAVI para poder detectar la actividad fotosintética y encontrando posibles diferencias en la composición de las coberturas destacando la vegetación xerófila.

El análisis de la respuesta espectral obtenida indica que la diversidad de la flora de las zonas semiáridas resulta ser compleja para su monitoreo, debido primordialmente a la fenología, densidad de la cobertura y a la alta reflectancia de los diferentes tipos de suelos. A pesar de la implementación de índices de vegetación modificados se logra tener un incremento en la distinción de la cobertura de vegetación xerófila, en los valores digitales de las imágenes satelitales diseñadas para el monitoreo de los recursos naturales, la resolución espacial y espectral fueron determinantes para este trabajo, destacando que son insumos de libre acceso.

Los resultados obtenidos de la respuesta espectral de la cobertura de vegetación y los índices NDVI y SAVI, fueron empleados en la elaboración de mapas temáticos, donde se representan las diferentes condiciones de la vegetación según su comportamiento espectral. Además de la elaboración de un sistema de información geográfica (SIG), para el procesamiento y manejo de la información generada.

## INTRODUCCIÓN

La protección de los recursos naturales es indudablemente una acción prioritaria y requiere de un monitoreo de manera local hasta global con el propósito de identificar y caracterizar áreas críticas, producto de la velocidad y magnitud de los cambios naturales y antrópicos. Evaluando el creciente deterioro ambiental. Para ello la Teledetección y los Sistemas de Información Geográfica representan una herramienta útil para el diagnóstico y evaluación de los recursos naturales

La percepción remota se destaca por ser una herramienta de análisis espacial con alcances para exploración y monitoreo de la superficie terrestre, tales como la identificación de actividades agrícolas, catastrales, militares, industriales, ordenamiento territorial y sobre todo en los recursos naturales. En los últimos años se han analizado y evaluado los recursos naturales por medio de percepción remota. Una de las principales aplicaciones es la determinación de la distribución de las coberturas vegetales por medio de interpretación visual y digital.

Las zonas áridas de México ocupan aproximadamente el 40 % de la superficie del país con 58.5 millones de hectáreas de vegetación árida, es el más vasto de todos los tipos de vegetación de México. El Desierto de Chihuahua es uno de los desiertos mega diversos del mundo. Cubre una extensión aproximada de 507 000 km<sup>2</sup>. Los distintos hábitats que conforman esta ecoregión, constituyen paisajes únicos, aproximadamente un 30 % de las cactáceas del mundo crecen en este desierto.

Uno de los factores que llevan al deterioro de la vegetación del desierto es el sobrepastoreo por ganado caprino y bovino que ha causado desertificación y erosión, la invasión de plantas exóticas y la pérdida de plantas nativas, así como la falta de conocimiento sobre la importancia de las zonas áridas. Sin duda la presencia del ser humano ha ejercido profundas repercusiones en el aspecto del paisaje, en la ecología y en la composición de la biota de las zonas áridas mexicanas; lo que ha desembocado en una precaria situación ambiental, cuyo

problema fundamental se manifiesta en el fenómeno de la desertificación. Así mismo la percepción remota enfrenta uno de los retos más grandes dentro de sus aplicaciones es mostrar las diferentes coberturas de vegetación del desierto, debido a la respuesta espectral del suelo desnudo es a menudo mayor que la de la vegetación dispersa, lo que hace difícil aislar la señal de la vegetación.

## I. MARCO TEÓRICO

Los desiertos se perciben como lugares inhóspitos e improductivos, en donde la escasa precipitación casi nunca supera los 250 mm al año y el terreno es árido (Hernández, 2006). Dimmitt (2000) los define como comunidades biológicas cuyos organismos, en su mayoría, están adaptados a aridez crónica, determinada por sequías periódicas y extremas, y como lugares en donde estas condiciones son necesarias para mantener la estructura de dichas comunidades. La aridez entonces es el factor que determina el desarrollo de los desiertos, así como la morfología, fisiología y el comportamiento de sus habitantes que varían en tamaño y forma, desde el nivel del mar hasta altas elevaciones (Cotera, 1999).

Las regiones desérticas se clasifican de acuerdo al grado de aridez a que están sometidas. La UNESCO (1997) creó criterios de delimitación de las zonas áridas y semiáridas con base en los índices de aridez bioclimática. Este índice, resultado de la relación P/ET (P= precipitación media anual; ET= evapo-transpiración media anual), permite delimitar de forma cuantitativa los diferentes grados de aridez. Así, los desiertos se agrupan en tres clases según su nivel de aridez:

1. *Zonas hiperáridas* (P/ET < 0.03)
2. *Zonas áridas* (P/ET = 0.03-0.2)
3. *Zonas semiáridas* (P/ET = 0.2-0.5)

Según el esquema de clasificación de la UNESCO (1997), cerca de 55 % del territorio de los desiertos de Norteamérica es semiárido, 40 % árido y el 5 % restante hiperárido (MacMahon, 1979).

## 1.1. Zonas áridas y semiáridas de México

De acuerdo con el Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI), el 49.1 % del territorio de México es semiárido o árido (Figura 1). Los climas áridos, caracterizados por una precipitación de 300 a 600 mm, afectan a 28.3 % del territorio, mientras que el restante 20.8 % tiene climas áridos (<100-300 mm de precipitación). La mayor parte de estas áreas corresponden a las dos grandes regiones desérticas de México, los desiertos Chihuahuense y Sonorense. Además, hacia el sur de México se ubica una región semiárida relativamente pequeña pero muy importante por su riqueza biológica. El complejo de Valles de Tehuacán-Cuicatlán, en los estados de Puebla y Oaxaca (Hernández, 2006).

Las principales regiones desérticas del país son:

- El Desierto de Sonora.
- El Desierto de Baja California.
- Zona semiárida de Puebla y Oaxaca (Valle de Tehuacan-Cuicatlán).
- El Desierto Chihuahuense.
- 

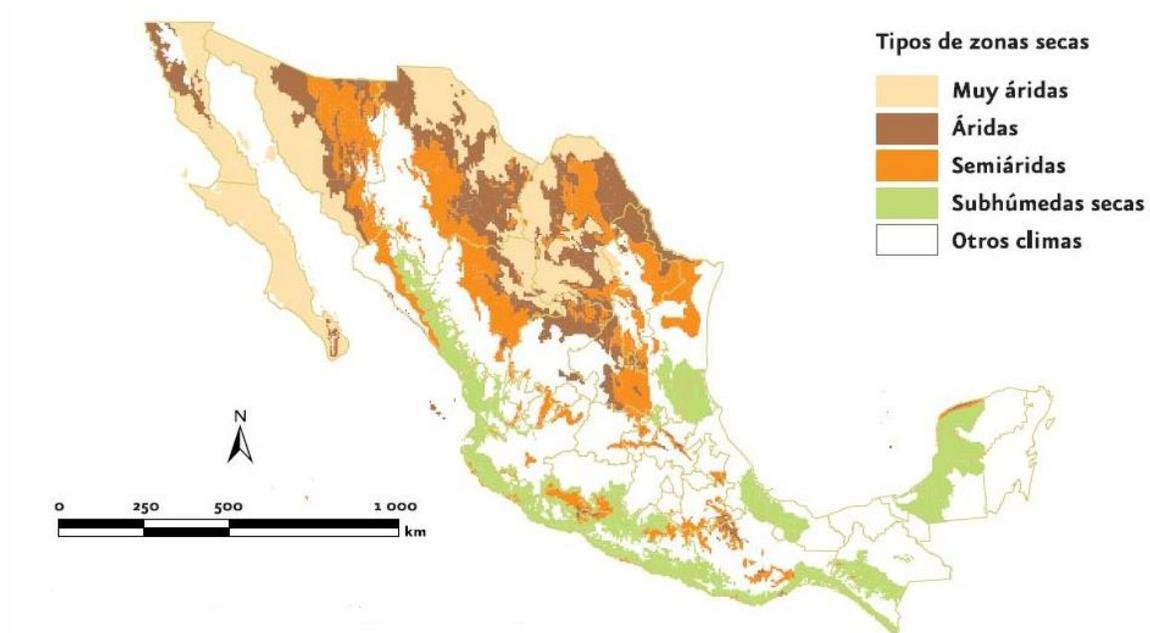


Figura 1. Distribución de las zonas secas en México. Fuente: <http://www.semarnat.gob.mx/>

El Desierto Chihuahuense es considerado entre las 37 regiones del mundo con mayor extensión de áreas silvestres poco perturbadas (Mittermeier *et al.*, 2002). Con una superficie de 507 000 km<sup>2</sup>, en altitudes aproximadas que van de 1000 a 2500 msnm (Rzedowski, 1968), resulta ser el desierto más extenso de Norteamérica pero también del que menos se sabe sobre su biodiversidad y relaciones ecológicas.

El Desierto Chihuahuense es una de las áreas con mayor diversidad biológica y numerosas especies endémicas de plantas y animales se le considera una de las tres regiones desérticas más importantes del mundo (Mittermeier *et al.*, 2002; Hernández, 2006), lo cual incrementa su importancia desde la perspectiva de la conservación. Como consecuencia de la heterogeneidad de ambientes en este desierto, su flora abarca entre las 3500 especies y cerca de 1000 especies de plantas endémicas. Entre las familias de plantas más sobresalientes por su diversidad destacan las Asteraceae, Poaceae, Fabaceae y Cactaceae (Henrickson y Johnston, 2004; Mittermeier *et al.*, 2002; Hernández, 2006; Cervantes-Ramírez y Franco-González, 2008)

Henrickson y Johnston (1986), realizaron un estudio de la vegetación del Desierto Chihuahuense y reportaron 16 diferentes comunidades vegetales para la región. Estas categorías las agruparon en cuatro que se correlacionan con las condiciones climáticas. Los matorrales desérticos se desarrollan en las áreas con mayor grado de aridez, conforme aumentan los niveles de precipitación se observa una transición hacia los pastizales y chaparrales, y hasta los bosques de montaña. La mayor parte de la superficie de este desierto está cubierta por matorrales, sobre todo por matorral micrófilo de gobernadora, sin embargo, otros tipos de vegetación que ocupan extensiones considerables, es caso del matorral rosetófilo, el izotal, el mezquital, el pastizal de grama y el chaparral (Tabla 1). Cuya existencia se determina por factores edáficos y climáticos, ocupando individualmente extensiones menores de 2 % del área del Desierto Chihuahuense.

Tabla 1. Comunidades vegetales del Desierto Chihuahuense con sus especies más características.

Comunidad vegetal	Especies características	Extensión (%)
I. MATORRALES Y BOSQUES DESÉRTICOS		
Matorral micrófilo	<i>Larrea tridentata</i> , <i>Flourensia cernua</i> , <i>Jatropha dioica</i> , <i>Krameria erecta</i>	70
Matorral rosetófilo	<i>Agave lechuguilla</i> , <i>Hechtia glomerata</i>	7
Izotal	<i>Yucca filifera</i> , <i>Y. carnerosana</i> , <i>Dassylirion</i> spp.	5
Mezquital	<i>Prosopis glandulosa</i> , <i>P. laevigata</i>	5
Matorral halófilo	<i>Atriplex</i> spp.	2
Matorral gipsófilo	<i>Tequilia</i> spp., <i>Petalonyx crenatus</i>	2
Matorral crassicaule (nopalera y garambullal)	<i>Opuntia</i> spp., <i>Myrtillocactus geometrizans</i>	<1
Bosque ripario	<i>Salix</i> spp., <i>Prosopiss</i> spp., <i>Fraxinus velutina</i> , <i>Populus fremontii</i>	<1
II. PASTIZALES		
Pastizal de grama	<i>Bouteloua</i> spp.	5
Zacatonal	<i>Sporobolus</i> spp.	2
Pastizal de tobosa	<i>Hilaria mutica</i>	2
III. CHAPARRAL		
Chaparral montano	<i>Quercus</i> spp.	5
IV. BOSQUE DE MONTAÑA		
Bosque de enebros y piñones	<i>Juniperus</i> spp., <i>Pinus</i> spp.	1
Encinar	<i>Quercus</i> spp.	<1
Pinar	<i>Pinus</i> spp.	<1
Bosque mixto de abetos	<i>Pseudotsuga menziesii</i> , <i>Abies durangensis</i> , <i>Pinus</i> spp.	<1

La columna *Extensión*, es una estimación del porcentaje del área total de la región (tomado de Henrickson y Johnston 1986).

## 1.2. La Comarca Lagunera

La Comarca Lagunera se integra políticamente con un total de quince municipios: 5 en Coahuila: Francisco I. Madero, Matamoros, San Pedro, Torreón y Viesca y 10 en Durango: General Simón Bolívar, Gómez Palacio, Lerdo, Mapimí, Nazas, Rodeo, San Juan de Guadalupe, San Luis del Cordero, San Pedro del Gallo y Tlahualilo. Estos municipios comparten una serie de atributos naturales y socio-económicos a la vez que reconocen en la conurbación de Torreón-Gómez Palacio-Lerdo a la ciudad de jerarquía superior y nodo primario de comunicaciones y transportes de esta región. Históricamente, este conjunto de municipios han estado ligados por los recursos naturales disponibles, el tipo de poblamiento

y las actividades económicas que los sostienen (Hernández-García, 2008; Sánchez-Crispín, 2008).

Los recursos bióticos de la región biogeográfica que se encuentran dentro de la provincia xerófila mexicana, en la región neotropical. En esta ubicación se combina una fisiografía y complejo relieve, se manifiesta en la existencia de variaciones microclimáticas, edáficas y ha dado origen a una gran diversidad y endemismos de flora; dentro de los patrones de aridez que existen en esta zona, tres modelos básicos de asociaciones vegetales, presenta diversos subtipos prevaecientes y que en orden de importancia en la región son: matorral xerófilo, pastizal y bosque mixto (Rzedowski. 1978; Cervantes-Ramírez y Franco-González 2008).

### **1.3. La flora de la Comarca Lagunera**

Las especies representativas de la Comarca Lagunera, suelen ser las más comunes y basadas en trabajos publicados en la región, estimándose en aproximadamente 95 familias, 368 géneros y 777 especies de plantas vasculares (González *et al.*, 1991; Herrera, 2001; García-Arévalo *et al.*, 1998; Villarreal-Quintanilla y Encina-Domínguez, 2005).

Los taxa descritos en los reportes se distribuyen en diferentes geoformas, ya sean valles, laderas, dunas y montañas. Con diferentes especies adaptadas: *Taxodium mucronatum*, *Populus fremontii*, *Salix exigua*, *Salix goodingii* y *Typha domingensis* a lo largo de la rivera de los ríos; en dunas, las especies más conspicuas son *Yucca elata*, *Ephedra trifurca*, *Dalea scoparia* y *Acacia constricta*; en cerros y montañas *Yucca* spp., *Hechtia glomerata*, *Fouquieria splendens*, *Dassylirion wheeleri*, *Agave lechuguilla* y en valles y planicies *Larrea tridentata*, *Agave scabra*, *Prosopis glandulosa.*, *Opuntia* spp., *Castela texana* y *Atriplex acanthocarpa*.

La mayor altitud que se alcanza en la Comarca Lagunera son los 3200 msnm, denominada Sierra de Jimulco, donde se distribuye una zona boscosa donde se encuentran especies

como: pino piñonero, endémico del norte de México; *Quercus coahuilensis*, especie de encino endémico del Desierto Chihuahuense y *Agave macroculmis*, especie de maguey que se distribuye en zonas de alta montaña (Hernández-García, 2008).

## **1.4. Percepción remota**

Los orígenes de la percepción remota se remontan al año de 1859, cuando se toman las primeras fotografías aéreas desde un globo aerostático. La percepción remota (PR) es una herramienta fundamental en la aplicación de estudios relacionados con la observación, evaluación y monitoreo de los recursos naturales (Gibson, 2000), permite obtener información a distancia de la superficie terrestre o marina, a partir de imágenes de los sensores instalados en plataformas aéreas y espaciales, asumiendo que entre la superficie terrestre y el sensor existe una interacción energética, ya sea de reflexión de la energía solar o de un haz energético artificial por emisión propia.(Chuvienco, 1996).Utilizando de base el espectro electromagnético, en la percepción remota se destacan una serie de bandas espectrales, que son las más frecuentemente empleadas y su denominación varía según los autores. En resumen los elementos básicos de la PR consisten en: sensor, objeto y flujo energético.

### **1.4.1. Percepción remota y vegetación**

La cobertura vegetal es discriminada por medio de técnicas de percepción remota y de esta manera se determina la distribución de la vegetación a partir de su reflectividad y discriminándola de otros factores que pueden llegar a perturbar la señal radiométrica entre los de mayor influencia que se tiene es la reflectividad del suelo. La cobertura vegetal responde a ciertas longitudes de onda del espectro electromagnético, notablemente en el espectro visible de la longitud de onda del color verde tiene una reflectividad mayor que en el color rojo y azul, pero tiene una notable reflectividad en la longitud de onda del infrarrojo cercano. De esta manera, se pueden observar diversos tipos de vegetación debido

a parámetros como la forma, pigmentos, tamaño, estructura, contenido de agua, el tipo de sustrato, densidad y composición (Meliá y Gilarbert., 1993).

#### **1.4.2. Constitución física de la hoja y su reflectividad espectral**

La respuesta espectral que presenta la actividad fotosintética de la vegetación se relaciona con la reflectividad de la hoja, que suele ser la presencia de pigmentos, estructura celular, el contenido de humedad, características geométricas, la geometría del dosel entre otros aspectos derivados de la situación geográfica, la pendiente, la reflectividad del suelo y hasta las condiciones de la atmosfera.

La absorción de la longitud de onda del espectro visible azul en las plantas, se asocia por los pigmentos de las hojas, tales como las clorofilas, xantofila y carotenos estos pigmentos muestran una alta absorción entre 0.4-0.5  $\mu\text{m}$  de longitud de onda (ultravioleta-azul) y del 0.6-0.7  $\mu\text{m}$  (rojo), entre ambas porciones del espectro aparece una banda intermedia alrededor de los 0.5  $\mu\text{m}$  en donde el efecto absorbente es menor a la cual corresponde la parte de la banda verde del espectro electromagnético y esto es el resultado del color verde de la vegetación que percibe el ojo humano (Chuvienco, 2002). La máxima reflectividad de la vegetación es en el infrarrojo cercano, se debe a la baja absorción de los pigmentos y a la estructura de la hoja. La fisiología de las hojas está determinada por cuatro porciones esenciales: epidermis superior e inferior, en parénquimas empalizada y esponjoso. La epidermis está cubierta por una capa cerosa, que le permite manejar dentro de cierto rango, la humectación de la misma; esta capa transmite el paso casi total de la energía a las capas siguientes. Después de ella existe una capa de células alargadas que constituyen el parénquima empalizada, donde se capta la mayoría de ondas electromagnéticas correspondientes a la parte de las bandas del espectro visible y se transmiten las del infrarrojo cercano e intermedio y una parte del IR térmico (Lemus, 1999). En el parénquima esponjoso da lugar a los cambios gaseosos necesarios para la respiración de las plantas, donde se refleja el 50 % de la banda del infrarrojo.

## 1.5. Espectro electromagnético

Las ondas electromagnéticas se definen como la propagación de un campo eléctrico y un campo magnético en el espacio. La radiación es una forma de transmisión de la energía por medio de ondas, con o sin la presencia de un medio material y a una velocidad en el vacío de 299 792 458.108 m/s (velocidad de la luz).

Cualquier tipo de energía radiante, se puede identificar en función de su longitud de onda o frecuencia. Existe una gama de bandas donde la radiación electromagnética presenta un comportamiento similar, comprenden desde longitudes cortas como los rayos gamma o X, hasta longitudes kilométricas como las telecomunicaciones (Figura 2).

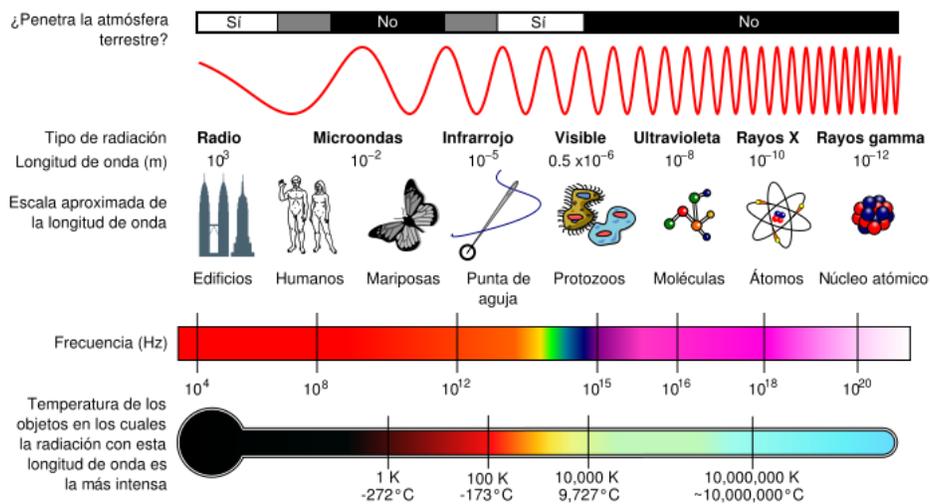


Figura 2. Espectro Electromagnético Fuente: <http://www.astrored.org>.

Utilizando de base el espectro electromagnético, en la percepción remota se destacan una serie de bandas espectrales, que son las más frecuentemente empleadas y su denominación varía según los autores pero Chuvieco (1996), lo define de la siguiente manera:

### **1.5.1. Espectro visible**

Se denomina de esta manera debido a que es la forma más familiar de las ondas electromagnéticas que el ojo humano puede detectar, su longitud de onda va de los 0.4 a 0.7  $\mu\text{m}$ , se produce mediante la reorganización de los electrones en los átomos y moléculas, sus diversas longitudes de onda que corresponden a los diferentes colores van desde el rojo ( $\lambda \approx 7 \times 10^{-7} \text{ m}$ ) hasta el violeta ( $\lambda \approx 4 \times 10^{-7} \text{ m}$ ). Así la sensibilidad del ojo humano es una función de la longitud de onda, resultando ser máxima a una longitud de onda de alrededor de  $5.5 \times 10^{-7} \text{ m}$  (Raymon y Serway, 2005).

### **1.5.2. Las ondas infrarrojas**

Tienen longitudes de onda que van desde  $1 \times 10^{-3} \text{ m}$  hasta  $7 \times 10^{-7} \text{ m}$ , la luz visible de longitud de onda más larga, estas ondas son producidas por moléculas y objetos a la temperatura ambiente, son fácilmente absorbidas por la mayor parte de los materiales. La energía infrarroja es absorbida e incrementa la energía de los átomos y como resultado un incremento en la temperatura. La radiación infrarroja tiene aplicaciones prácticas y científicas en muchas áreas, eje fundamental para el monitoreo de la vegetación y otros estudios de la percepción remota (Chuvioco, 1996; Raymon y Serway, 2005).

### **1.5.3. Infrarrojo próximo o cercano**

Se denomina también infrarrojo reflejado y resulta de gran importancia por la capacidad de discriminar las áreas con vegetación y concentraciones de humedad y su longitud de onda alcanza los 0.7 a los 1.3  $\mu\text{m}$ .

### **1.5.4. Infrarrojo medio**

La longitud de onda en esta zona va de 0.1 a los 8  $\mu\text{m}$ ., se entremezclan los procesos de reflexión de la luz solar y de emisión de la superficie terrestre y resulta capaz de estimar el contenido de la humedad en la vegetación y la detección de alta temperatura.

### **1.5.5. Infrarrojo lejano o térmico**

Incluye la porción emisiva del espectro terrestre que va de 8 a 14  $\mu\text{m}$ ., donde se detecta el calor proveniente de la mayor parte de la cubierta terrestre.

### **1.5.6. Micro-ondas**

De gran importancia por ser un tipo de energía bastante transparente a la nubosidad y ciertas partes de la atmósfera a partir de 1  $\mu\text{m}$ .

## **1.6. Resolución de los sensores remotos**

Los principales sensores remotos utilizados en estudios de vegetación se seleccionan en función de su resolución espacial, espectral y temporal. Con los sensores remotos se pueden llevar a cabo el monitoreo de ecosistemas, la distribución de la vegetación a diferentes escalas, la detección y prevención de incendios y el análisis multitemporal del cambio de la cobertura vegetal. Algunos de los sensores más utilizados son NOAA-AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer), con imágenes que pueden abarcar el país diariamente, MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer), ideales para el monitoreo en gran escala de la biosfera. La serie LANDSAT, Spot, IRS y ASTER, resultan adecuados para trabajos a nivel regional. En la actualidad existen otros sensores que pueden producir cartografía a nivel local tales como IKONOS, Quick Bird o RAPID EYE con el detalle de tener un alto costo de adquisición (Castillo, 2005).

### **1.6.1. Resolución espacial**

Se designa al objeto más pequeño que se puede distinguir en una imagen. Está determinada por el tamaño de pixel medido en metros sobre el terreno; esto depende de la altura del sensor con respecto a la superficie terrestre, velocidad de exploración, ángulo de visión y las características ópticas del sensor. Esto está estrechamente relacionado con la escala de trabajo y con la fiabilidad obtenida en la interpretación de la imagen, cuanto menor sea el

tamaño de pixel, menor será la probabilidad de que este sea un compuesto de dos o más cubiertas terrestres (Chuvienco, 1996).

### **1.6.2. Resolución espectral**

Consiste en el número de canales espectrales y su ancho de banda que es capaz de captar un sensor, esto es registrar simultáneamente el comportamiento de los objetos en distintas bandas del espectro, un sensor resulta más eficiente cuanto mayor número de bandas proporcione ya que facilita la caracterización espectral de las distintas bandas (Chuvienco, 1996).

### **1.6.3. Resolución radiométrica**

Se hace mención a la sensibilidad del sensor, a su capacidad para detectar las variaciones en la radiancia espectral que recibe. Cuanto mayor sea la precisión radiométrica mejor se podrá interpretar la imagen que representa el rango dinámico o valor que puede tomar un pixel (Chuvienco, 1996).

### **1.6.4. Resolución temporal**

Es la frecuencia de la cobertura que proporciona el sensor, también conocida como la periodicidad con la que este adquiere imágenes de la misma área de la superficie terrestre. El ciclo de la cobertura se relaciona con la función y características con las que fueron diseñadas la orbitas de las diferentes plataformas (altura, velocidad, inclinación), así como el diseño del sensor principalmente del ángulo total de la abertura (Chuvienco, 1996).

## **1.7. Imágenes de satélite**

Una imagen satelital o imagen de satélite se define como la representación visual de la información capturada por un sensor montado en un satélite artificial. Estos sensores

capturan información reflejada por la superficie terrestre, posteriormente será procesada la información sobre las características terrestres o marinas y enviada a la Tierra convenientemente.

La primera imagen satelital de la tierra fue tomada el 14 de agosto de 1959 por el satélite estadounidense Explorer 6.1. La primera fotografía satelital de la luna fue tomada por el satélite soviético Luna 3, el 6 de octubre de 1959, en una misión para fotografiar el lado oculto de la Luna.

Los satélites de observación de la Tierra obtienen datos en el menor tiempo posible para dar seguimiento a la evolución de un fenómeno. Nunca antes se tuvo tanta información acerca de la evolución de la superficie terrestre, y lo más sorprendente es la relativa rapidez para recibir los datos en tiempo real, en un centro de control.

Cada vez tenemos imágenes de mayor resolución, con mayor cantidad de bandas en el espectro electromagnético y mayor disponibilidad para los usuarios, lo que amplía su potencial de aprovechamiento para fines diversos.

### **1.7.1. Imágenes del satélite LANDSAT 7 ETM +**

El programa LANDSAT se compone por una serie de satélites, denominados: LANDSAT 1 al LANDSAT 7, desde el año 1972, fueron diseñados con el objetivo de recopilar información acerca de los recursos naturales terrestres.

El satélite LANDSAT 7, fue lanzado el 19 de abril de 1999, cuenta con una órbita polar a 705 km 8 bandas, con un rango de longitud en el espectro electromagnético (0.450  $\mu\text{m}$  – 0.900  $\mu\text{m}$ ), cuenta con una resolución radiométrica de (8 bits) y espacial de 30 m, cubriendo la superficie terrestre en 16 días, su sensor ETM+ (Enhanced Thematic Mapper + Scanner), cuenta con las siguientes características: una banda pancromática con resolución espacial de 15 m y un canal térmico de infrarrojos con 60 m de resolución espacial

(<http://landsat.gsfc.nasa.gov>). La descripción del análisis visual de imágenes se realiza en composiciones RGB, sin alterar los niveles digitales suministrados por el sensor (Tabla 2).

Tabla 2. Características espectrales de los sensores remotos.

Tipo de imagen		Bandas	Zona del espectro electromagnético	Resolución espectral ( $\mu\text{m}$ )	Resolución espacial (m)	Resolución temporal
LANDSAT 7 ETM +	8	1	Visible-Azul	0.45-0.515	30	16 días
		2	Visible-Verde	0.525-0.605	30	
		3	Visible-Rojo	0.63-0.690	30	
		4	Infrarrojo Próximo	0.75-0.90	30	
		5	Infrarrojo Lejano	1.55-1.75	30	
		6	Infrarrojo Térmico Lejano	10.40-12.5	60	
		7	Infrarrojo Térmico Próximo	2.09-2.35	30	
		8 Pancromática	Prácticamente todo el visible	0.52-0.90	15	
MODIS TERRA- AQUA	36	1, 2	Visible- Azul y Verde	620-670 nm	250	1 a 2 días
		3,4,5,6,7	Visible Rojo- Infrarrojos	459-2155 nm	500	
		8 - 36	Infrarrojos	2105 nm- 14.385 $\mu\text{m}$	1000	

### 1.7.2. Imágenes del satélite MODIS

El sensor MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer), se caracteriza por tener una alta resolución radiométrica (12 BIT), en 36 bandas espectrales, con rangos en las longitudes de ondas del espectro electromagnético (0,405  $\mu\text{m}$  y 14,385  $\mu\text{m}$ ) (<http://modis.gsfc.nasa.gov>). Sus 36 bandas se caracterizan por: las bandas del visible 1, 2

tienen una resolución espacial de 250 m, las bandas 3, 4, 5, 6, 7, azul y las del infrarrojo cercano poseen una resolución espacial de 500 m, las otras 29 (8-36) tienen una resolución espacial de 1000 m (Tabla 2). MODIS se encuentra a bordo de los satélites TERRA y AQUA del sistema de observación terrestre de la NASA, cubren la superficie terrestre en un periodo de uno a dos días. Los datos obtenidos por MODIS mejoran el entendimiento de los procesos dinámicos globales ocurridos en la tierra, océano y la baja atmósfera estudio a largo plazo de la dinámica, alcance e implicaciones del cambio global (Rodríguez-Chávez y Arredondo-Bautizta, 2005).

Las imágenes MODIS son usadas para el cálculo del índice de vegetación, también permiten realizar medidas radiométricas de la cantidad, estructura y condiciones de la vegetación (García-Mora y Mas, 2011. Presentación del sensor MODIS), llegando a ser una herramienta muy precisa al utilizar series de tiempo de alta frecuencia temporal, aplicándolo al análisis de los ecosistemas y sus principales parámetros de medida son:

- Cubrimiento de Vegetación y Biomasa.
- Índice LAI (Leaf Area Index)
- Índice FPAR (Fraction of Photosynthetically Active Radiation)
- Índice NDVI (Normalized Difference Vegetation Index)
- Índice EVI (Enhanced Vegetation Index)

## **1.8. Interpretación de imágenes de satélites**

Los procedimientos para poder realizar la interpretación, pueden ser de manera explícita (razonamiento intelectual) o implícitos (análisis digital de la imagen). Los modelos explícitos requieren un diseño riguroso a priori, como redes o reglas de producción semánticas, los modelos implícitos llegan a ser entrenados generalmente por un operador humano llamado sistemas de aprendizaje. Los ejemplos de los procedimientos implícitos son la clasificación multiespectral en percepción remota (Bähra y Lenkb, 2005).

La interpretación visual es clave en la identificación de los objetos, así como de las características que se encuentren en la imagen, hasta hace poco tiempo, lo habitual en la interpretación visual ha sido a partir de los productos fotográficos y depende de la intervención del hombre la cual es una ventaja sobre el análisis digital ya que requiere de criterios complejos en el momento del análisis. Por esta razón el intérprete debe dominar los elementos de interpretación visual, así como tener un conocimiento profundo de lo que examina y del área de interés.

### 1.8.1. Principales elementos de interpretación visual

Rabben (1960) señala seis elementos básicos de la interpretación visual: **Tamaño, Forma, Sombra, Tono y Color, Textura y Patrón**. Verstappen (1977) consideró el tono (reflectividad), la forma y la posición como elementos básicos de la interpretación usados para la detección de rasgos en el terreno, pero considero la asociación como uno de los elementos importantes para el reconocimiento y la identificación (King, 2002).

Los elementos más comúnmente empleados en la interpretación de las imágenes por medio de un análisis visual (CCRS, 2006; Chuvieco, 2002; Janssen y Jackson., 2001) son:

- El **Tono** se define como el brillo relativo de una imagen en blanco y negro, la tonalidad se refiere al color en la imagen según lo definido en el sistema de la intensidad-tonalidad-saturación (IHS); las variaciones totales son importantes en la interpretación de los elementos de la imagen. La expresión tonal de los objetos en la imagen se relaciona directamente con la cantidad de luz (energía) reflejada desde la superficie. Diversos tipos de roca, de suelo o de vegetación tiene muy probable diversos tonos. Las variaciones en condiciones de la humedad también se refleja con diferencias de tono en la imagen: los tonos son más oscuros según aumenta el contenido de agua. Las variaciones en tonalidad se relacionan sobre todo con las características espectrales del área media y también con las bandas seleccionadas para la visualización.

- La **Forma** puede ser una característica discriminadora en muchos objetos del terreno visibles en la imagen. La forma también se relaciona con la altura son importantes para distinguir entre diversos tipos de vegetación y también en mapeo geomorfológico. La forma de los objetos ayudan a menudo a identificarlos (cultivos, cuerpos de agua, zonas urbanas, entre otros).
- El **Tamaño** de los objetos se puede considerar en sentido absoluto o relativo de la superficie terrestre, nos permite estimar las dimensiones de los mismos: el ancho de un tráiler se puede estimar comparándolo al tamaño de los coches.
- El **Patrón** se refiere al arreglo espacial de los objetos e implica la repetición característica de ciertas formas o relaciones, el patrón se puede describir por términos tales como concéntricos, radial, en forma de diámetro, etc. Algunas utilizaciones del suelo, sin embargo tiene patrones específicos y características, cuando son observadas en los datos aeroespaciales, otros ejemplos típicos incluyen el sistema hidrológico (río con sus afluentes) y los patrones relacionados con la erosión.
- La **Textura** se relaciona con la frecuencia del cambio del tonal, la textura se pueden describir por términos como gruesos o finos, lisos o ásperos, abigarrados, manchados, granular, linear, lanosa, etc. La textura se relaciona fundamentalmente con la resolución espacial del sensor aplicado. Un patrón es una imagen de escala grande, puede resultar en una textura sobre una imagen de la escala pequeña de la misma escena.
- El **Sitio** se relaciona con la localización topográfica o geográfica, un ejemplo típico de este elemento de la interpretación es que un manglar no se puede ubicar en una montaña.
- La **Asociación** considera la relación entre otros objetos o características identificables en la proximidad del objeto de interés. La identificación de características que uno espera asociar a otras características puede proporcionar la información para facilitar la identificación, por ejemplo: las características comerciales se pueden asociar a la proximidad de las rutas importantes del transporte,

mientras que el área residencial serían asociadas a las escuelas, patios y campos de diversión.

- La **Sombra** es también provechosa a la interpretación puede proporcionar una idea del perfil y de la altura relativa de un objeto. Sin embargo las sombras pueden también reducir o eliminar la interpretación en su área de influencia puesto que los objetos dentro de las sombras son mucho menos (o en absoluto) perceptibles que sus alrededores, la sombra es también útil para realzar o identificar la topografía y formas de la Tierra particularmente en imágenes de radar.
- El **Color** que percibe el ojo humano es el resultado de la reflectividad de los objetos a diferentes longitudes de ondas, algunos investigadores han manifestado que este órgano es el más sensible a las variaciones cromáticas de la intensidad luminosa (Chuvienco, 2002). Si a esto le agregamos el incremento de información sobre la composición de diversas bandas del espectro, se comprende que el color obtenido de algún objeto, es un elemento primordial en la interpretación visual de las imágenes.

### 1.8.2. Interpretación digital de las imágenes

En la interpretación digital, el usuario pone las condiciones para poder realizar una clasificación, la clasificación de la imagen es una de las técnicas del dominio de la interpretación digital. Una imagen puede ser dividida en clases diferentes, de tal forma que los pixeles que tienen propiedades espectrales similares son agrupados en la misma clase. La separación de estas clases, es realizada con métodos estadísticos o geométricos, la separación de clases o clasificación es más exitosa si los objetos son muy diferentes espectralmente, la precisión de la clasificación es afectada cuando los objetos a ser separados tienen características espectrales muy similares. El conocimiento del área a ser mapeada, es un requisito fundamental, así como un trabajo previo de campo, para la aplicación exitosa de las técnicas de clasificación de la imagen (Butler *et al.*, 1990).

## 1.9. Composición RGB

Las bandas de las imágenes se combinan para obtener información de la superficie terrestre o de la atmósfera, para resaltar algunos rasgos de interés. Entre las bandas más utilizadas están el azul, verde y rojo que conforman la luz visible, el infrarrojo cercano, el infrarrojo medio, el infrarrojo lejano o térmico y las microondas (Figura 3).

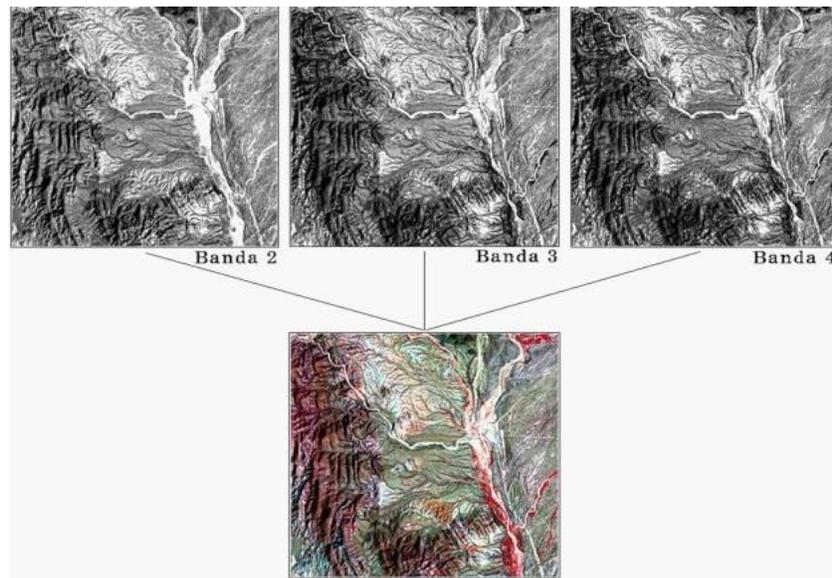


Figura 3. Diagrama de la combinación de las bandas 2, 3 y 4 de una imagen LANDSAT 7 ETM +, para resaltar la vegetación del suelo.

## 1.10. Índices de vegetación

El cálculo de índices es una técnica de uso habitual en la percepción remota y comúnmente utilizada para mejorar la discriminación entre dos cubiertas que presentan un comportamiento reflectivo muy distinto en dos o más bandas, por ejemplo para realzar suelos y vegetación en el visible e infrarrojo cercano y para reducir el efecto del relieve (pendiente orientación) en la caracterización espectral de distintas cubiertas (Chuvienco, 2008).

Los índices de vegetación se utilizan para discriminar coberturas vegetales de alta actividad fotosintética de otras coberturas en fases fenológicas iniciales y resultan ser parámetros calculados a partir de los valores de la reflectividad a distintas longitudes de onda y pretende extraer información de la vegetación minimizando la relación de las perturbaciones debidas al suelo y a las condiciones atmosféricas (Gilarbert, 1997).

El vigor de la vegetación adquiere un comportamiento espectral muy particular mostrando un alto contraste entre las bandas visibles, especialmente la banda roja y la del infrarrojo cercano (IRc), Chuvieco (1996) menciona que cuando la vegetación sufre algún tipo de estrés plagas, sequía, etc. su reflectancia será inferior en el infrarrojo cercano y en el rojo del visible, con lo que el contraste entre ambas bandas será mucho menor en relación con vegetación sana de gran vigor (Figura 4). En la región visible del espectro electromagnético, los cloroplastos de las hojas absorben la mayor parte de la energía que reciben reflejando en forma mínima en el infrarrojo cercano del espectro electromagnético. Esto permite visualizar y separar con claridad la vegetación de otras coberturas y estas diferencias determinan la base para el principio de los índices de vegetación como función de la radiación de las bandas visibles (Vis) e infrarrojo cercano (IRc).

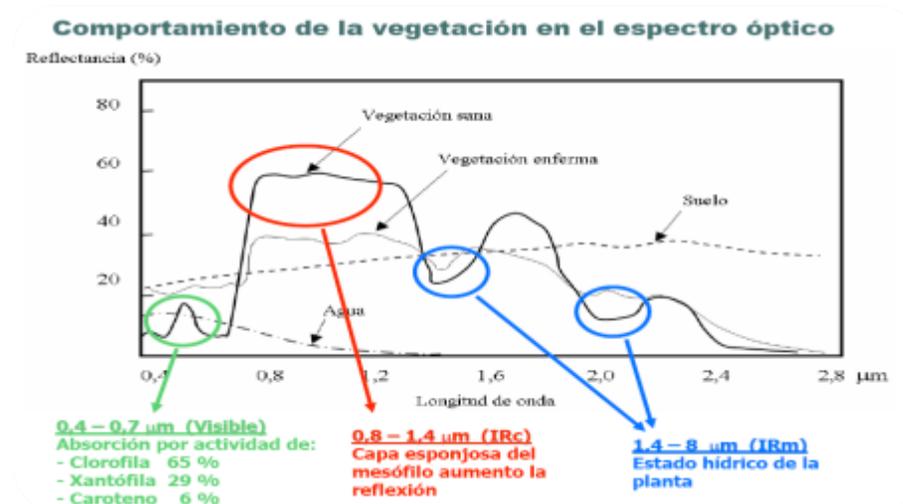


Figura 4. Firma espectral de la Vegetación.

Huete (1990) clasifican a los índices de vegetación (IVs) en dos grupos: los basados en la pendiente y los basados en la distancia. Para comprender la diferencia es necesario representar la posición de los píxeles de la vegetación en dos gráficos bidimensionales, graficando la reflectancia del rojo y del infrarrojo. El índice de vegetación basado en la pendiente resulta de una simple combinación aritmética que se centran en la respuesta de los patrones espectrales de la vegetación formando líneas que derivan desde el origen. Así los diferentes niveles de los índices pueden prever diferentes líneas en el espectro que difieren de su pendiente.

En contraste, los dos grupos de los índices de vegetación miden el estado de la vegetación actual evaluando la diferencia de cualquier píxel y la reflectancia del suelo desnudo. Formando una línea patrón conocida como línea de suelo, se muestra una tendencia para aumentar la distancia perpendicular a la línea de suelo (Amadou y Eastman, 2006).

Existe una gran gama de diversos índices de vegetación, los cuales tienen en común el uso de los valores de reflectancia y absorción en las zonas espectrales del rojo e infrarrojo cercano (Gilarbert, 1997; Sánchez *et al.*, 2000). A continuación se destaca las ventajas de cada uno de los índices a comprobar su efectividad para la zona de estudio y determinar que son confiables para el estudio de la vegetación de zonas áridas y semiáridas (Méndez-González *et al.*, 2007).

### **1.10.1. NDVI**

El índice de vegetación diferencial normalizada, por sus siglas en inglés NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), es una variable que permite estimar el desarrollo de una vegetación en base a la medición de la radiación de ciertas bandas del espectro electromagnético que la misma emite o refleja (Gutman, 1991; Gilarbet, 1997; Warren y Goward, 2004), propuesto por (Rouse *et al.*, 1974).

El cual se define como:

$$NDVI = \frac{(IRc - Vis)}{IRc + Vis}$$

Ecuación 1. Índice de Vegetación Diferencial Normalizada

dónde: IRc = Banda del infrarrojo cercano

Vis = Banda del visible rojo

Los valores de NDVI oscilan entre -1 y 1, debido al rango de variación al normalizarse, (Gilbert *et al.*, 1997; Soria-Ruiz y Granados-Ramírez, 2005), esto permite al índice identificar la presencia de vegetación verde en la superficie y caracterizar su distribución espacial así como la evolución de su estado a lo largo del tiempo. Esto es determinado fundamentalmente por las condiciones climáticas (Jackson *et al.*, 2001; Sebem *et al.*, 2005). La interpretación del índice debe asimismo considerar los ciclos fenológicos y de desarrollo anuales para distinguir oscilaciones naturales de la vegetación de los cambios en la distribución espacial causados por otros factores.

### 1.10.2. SAVI

El índice de vegetación ajustado a la línea del suelo, por sus siglas en inglés SAVI (Soil Adjusted Vegetation Index), implementado por Huete (1988) considera que las isolíneas de vegetación no eran ni paralelas a la línea del suelo ni convergentes en el origen, sino que son convergentes pero en un punto situado sobre la bisectriz de la región negativa del plano  $irc \pm r$ , es decir, en  $r=-l_1$  en  $irc=-l_2$ , siendo  $l_1=l_2$  (lo cual tampoco es completamente cierto en todos los casos), considerando  $l=l_1+l_2$ , definió al (SAVI), cuya expresión es:

$$SAVI = \frac{(IRc - r)}{(IRc + r + l)}(1 + l)$$

Ecuación 2. Índice de Vegetación Ajustada a la Línea del Suelo

dónde: IRc = Banda del infrarrojo cercano

Vis = Banda del visible rojo

$l$  = Parámetro de convergencia de las isolíneas

Este índice es muy parecido al NDVI (por lo tanto, también da lugar a una familia de rectas convergentes), salvo por el parámetro  $l$  cuya misión, como se ha mencionado es desplazar el punto de convergencia de las isolíneas a la región negativa del espacio  $r/irc$ . La expresión se multiplica por  $(1 + l)$  para mantener el rango de variación de este índice similar al del NDVI. Distintas pruebas efectuadas con este índice ponen de manifiesto que normaliza mejor la influencia del suelo que el NDVI (Huete y Warrick, 1990).

La principal desventaja que presenta este índice es la indeterminación inherente al parámetro  $l$  que, en principio, puede presentar un rango de variación desde 0 hasta  $+\infty$  aunque Huete (1988), sugiere tomar un valor igual a 1 para bajas densidades de vegetación, 0.5 para valores intermedios y 0.25 para una vegetación densa. Esto sugiere que para optimizar la  $l$  del SAVI se requiere *a priori* información relativa al LAI (índice de área foliar).

### 1.11. Sistemas de Información Geográfica

El Término “Geographic Information Sistem” (GIS), por sus siglas en inglés, fue propuesto en 1963 por el geógrafo Roger Tomlinson, por lo que se llega a un concepto de herramienta de análisis espacial para resolver problemas por medio de modelos que permiten encontrar patrones y entender cuáles son los eventos que dan origen a los fenómenos que se estudian y que son indexados a una base de datos a partir de un listado de referencia (Quintero-Pérez, 2009; López-Blanco, 2005). Los sistemas de información geográfica (SIG) se emplean como una herramienta que permite analizar datos vectoriales, datos raster y visualizar los resultados en forma de mapas (Figura 5).

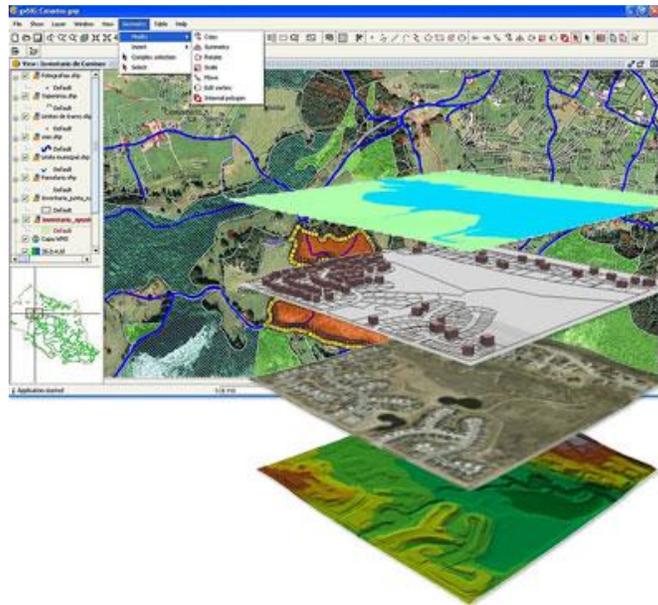


Figura 5. Visualización de un sistema de información geográfica (SIG).

Fuente: <http://www.tecnomar.com.ve/sig.php>

## II. JUSTIFICACIÓN

A pesar de la elevada riqueza biológica que caracteriza a los ecosistemas áridos y semiáridos de México (Mittermeier *et al.*, 2002; Hernández, 2006), así como su dinámica y sus grandes limitantes derivados de su susceptibilidad ambiental y condiciones climáticas adversas que los caracterizan como: altas temperaturas, alta radiación solar y patrones de lluvia impredecibles, existen patrones de vegetación constantes y diversos correlacionados con la aridez que existen en las diferentes regiones áridas y semiáridas del país. En estos ambientes, un adecuado manejo de los recursos naturales resultaría una manera sustentable para las comunidades, además para una adecuada conservación de áreas con un alto valor de biodiversidad de flora, siendo en comunidades que no resultan ser económicamente activas dentro de la Comarca Lagunera, se hace necesario identificar y cuantificar los cambios que se presentan en la cobertura vegetal a largo y corto tiempo.

La aplicación de tecnología satelital brinda la oportunidad de monitorear los recursos bióticos con certidumbre, en poco tiempo y a lo largo del mismo. Estas tecnologías han sido aplicadas exitosamente en los bosques templados y las selvas tropicales, de esta manera se monitorean como indicadores de biomásas entre otros, lo que permite administrar, gestionar y vigilar los recursos naturales para su sustentabilidad y conservación. Las zonas áridas y semiáridas hasta ahora han resultado difíciles de monitorear debido a la estacionalidad, fenología y cobertura de la vegetación y la alta reflectividad que emite el suelo, lo que genera imágenes difíciles de interpretar de manera visual y/o digital.

El desarrollo de aplicaciones que reflejen las condiciones para las regiones áridas abre la posibilidad de monitorear estos recursos y aplicarlos en regiones con poca accesibilidad.

El Instituto de Geografía de la Universidad Nacional Autónoma de México cuenta con un banco de imágenes LANDSAT, las imágenes MODIS son de libre acceso, proporcionadas por diversos portales web, y uno de ello resulta ser la NASA, se decide emplear estas

imágenes debido al factor de libre acceso, aunque existen imágenes de satélite de mayor resolución (espacial, espectral, radiométrica y temporal), con elevado valor comercial que nos limita a su acceso. Estas imágenes resultan de menor resolución y mayormente empleadas en cuestiones ambientales y climáticas con gran aceptación para trabajos a escalas estatales. El fin que se persigue es tratar de emplear esta tecnología sin requerir de realizar altas inversiones económicas que solo las instituciones podrían sustentar altos costos que requieren este tipo de investigaciones novedosas.

Por lo tanto, es posible emplear estas imágenes satelitales en la zona de la Comarca Lagunera para la evaluación de la cobertura vegetal y generar un compuesto que refleje las características de la zona para abrir las posibilidades de aplicar esta tecnología en otras zonas con vegetación xerófila del país.

Los índices de vegetación ayudan a definir patrones de cobertura vegetal, son indicadores de biomasa vegetal en diferentes tipos, como son los bosques de coníferas, pino-encino, selvas perennifolias, manglares entre otras coberturas. Además se han reportado trabajos muy precisos en ciertas zonas áridas en México que utilizan estas metodologías (Shupe y Marsh, 2004), siendo necesarios en la actualidad para un posible aprovechamiento, manejo y gestión sustentable de todos los ecosistemas áridos y semiáridos, con ello se probarán las ventajas del uso de la percepción remota para las regiones áridas del norte-centro de la República Mexicana.

### **III. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

Las comunidades xerófilas de las zonas áridas y semiáridas de México, resultan complejas de analizar con elementos de percepción remota (PR) a un alto costo. Se pretende elaborar un compuesto de falso color, que refleje de manera más pertinente la respuesta espectral de la vegetación de la Comarca Lagunera verificando con datos de campo. Se llevará a cabo una comparación entre índices de vegetación aplicadas a las imágenes satelitales del sensor MODIS-TERRA y del sensor LANDSAT 7 ETM +, cuya finalidad es comparar y decidir cuál de los índices de vegetación e imagen satelital resulta apropiado para este tipo de zonas áridas y semiáridas y definir en cuál de ellas se generan valores más confiables para la interpretación de la vegetación de la zona y todo con la mayor accesibilidad de información posible a cualquier usuario sin requerir de realizar inversiones altamente costosas o convenios institucionales.

### **IV. HIPÓTESIS**

El índice de vegetación SAVI generado en las imágenes LANDSAT 7 ETM + y MODIS-TERRA y, deben representar con mayor confiabilidad las características de la vegetación xerófila de la Comarca Lagunera, basado en la resolución espectral, en comparación con el índice NDVI generado con las imágenes LANDSAT 7 ETM + y MODIS-TERRA.

### **V. OBJETIVOS**

#### **5.1. General**

Emplear la percepción remota implementando el manejo de imágenes de satélite (LANDSAT 7 ETM + y MODIS-TERRA), enfocado a una zona semiárida del norte de México, y así poder verificar las coberturas de vegetación identificadas en campo para la región de la Comarca Lagunera México.

## 5.2. Objetivos particulares

1. Generar un compuesto de falso color RBG utilizando las bandas del infrarrojo cercano y del espectro visible de las diferentes imágenes satelitales para el área de estudio.
2. Obtener las firmas espectrales de la cobertura vegetal.
3. Obtener mapas de la cobertura vegetal.
4. Calcular los índices de vegetación NDVI y SAVI, con las imágenes MODIS-TERRA y LANDSAT 7 ETM + para la vegetación.
5. Evaluar y comparar la respuesta espectral de la cobertura vegetal, a partir de su firma espectral y utilizando índices de vegetación generados en las imágenes del sensor LANDSAT 7 ETM + y del sensor MODIS-TERRA.
6. Describir las diferentes asociaciones vegetales observadas en los puntos de caracterización fisionómica.
7. Realizar un sistema de información geográfica, donde se almacenará la información generada.

## VII. MATERIALES y MÉTODOS

### 7.1. Zona de estudio

La región de la Comarca Lagunera se localiza en las coordenadas límites: 104° 30' y 101° 30' longitud oeste y 24° 30' y 27° 00' latitud norte (Gabriel-Morales y Pérez-Damián, 2008) al centro-norte del Altiplano Mexicano, a una altitud de 1120 msnm., constituye un espacio desértico, lacustre hoy desecado, dentro de la región biogeográfica conocida como Desierto Chihuahuense y en la confluencia de los estados de Chihuahua, Zacatecas, Durango y Coahuila. (Cervantes-Ramírez y Franco-González, 2008). Las condiciones climáticas son en apariencia inhóspitas, ya que predominan climas áridos y semiáridos, las temperaturas oscilan entre los 9.3° y 28.7°c (Granados-Ramírez y Gómez-Rodríguez, 2008).

La Comarca Lagunera cuenta con una superficie de 42,684.856 km<sup>2</sup> distribuidos en 15 municipios de los cuales 10 en el estado de Durango y 5 en el estado de Coahuila de Zaragoza (Figura 6).

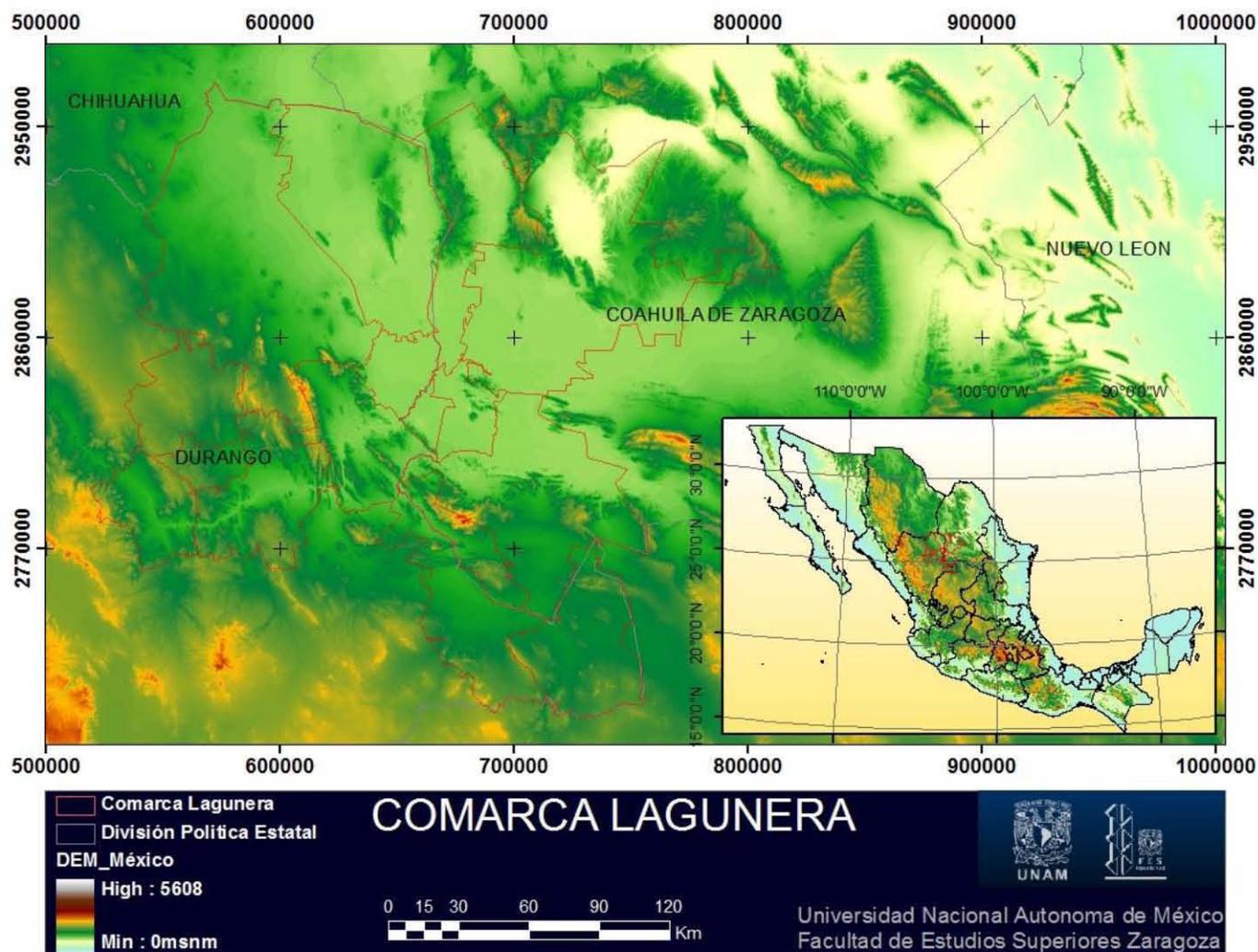


Figura 6. Localización del área de estudio.

Los municipios correspondientes al estado de Durango:

1. Gómez Palacio (1885)
2. Lerdo (1867)
3. Tlahualilo de Zaragoza (1890)
4. Mapimí (1588)
5. San Pedro del Gallo (1648)
6. San Luis Cordero (1845)
7. Rodeo (1915)
8. Nazas (1725)
9. General Simón Bolívar (1858)
10. San Juan de Guadalupe (1867)

Los municipios correspondientes al estado de Coahuila:

1. Torreón (1907)
2. Matamoros (1839)
3. San Pedro de las Colinas (1870)
4. Francisco I. Madero (1936)
5. Viesca (1731)

La Comarca Lagunera ocupa la 9ª Zona Metropolitana (ZML) a nivel nacional, con el 1.32 % de la población del país según datos del último censo INEGI 2010. (<http://www.inegi.org.mx/est/contenidos/proyectos/ccpv/cpv2010/Default.aspx>)

El sector económico de la Comarca Lagunera se compone por cinco sectores que forman el eje principal de su economía:

- La industria lechera (LALA).
- La industria minera y metalúrgica (PEÑOLES).
- La industria maquiladora
- La industria del transporte
- Agricultura y Ganadería

## 7.2. Fase de gabinete

Esta fase consistió en la selección y análisis de imágenes satelitales utilizadas en el monitoreo de los recursos naturales y de acceso libre, de esta forma se obtuvieron y procesaron imágenes satelitales del sensor LANDSAT 7 ETM +, del mes de mayo de 2000 y del sensor MODIS-TERRA del mes de mayo de 2009.

### 7.2.1. Obtención de imágenes satelitales

Se consideró la selección de imágenes satelitales a tratar, bajo el criterio de su resolución espacial y espectral considerando su fácil y libre acceso, siendo la NASA una de la instituciones que brinda imágenes del sensor MODIS-TERRA, a través del Sistema Geológico de los Estados Unidos, por sus siglas en inglés USGS (United States Geological Survey) desde el portal (<http://glovis.usgs.gov/>) de manera gratuita.

Para cubrir la zona de estudio fue necesario la adquisición de 8 imágenes (Tabla 3), del mes de mayo de 2000 del satélite LANDSAT 7 sensor ETM +, correspondiente a la zona 13 UTM (Universal Transverse Mercator) y con Path, Row que se muestra en la (Figura 7),

Tabla 3. Adquisición de imágenes LANDSAT 7 ETM +.

Path	Row	Zona UTM	Fecha de adquisición
31	41	13	20000522
31	42	13	20000517
31	43	13	20000519
30	41	13	20000519
30	42	13	20000522
30	43	13	20000523
29	42	13	20000531
29	43	13	20000524

Las imágenes LANDSAT ETM 7 +, fueron proporcionadas por el Laboratorio de Análisis Geoespaciales (LAGE) del Instituto de Geografía UNAM.

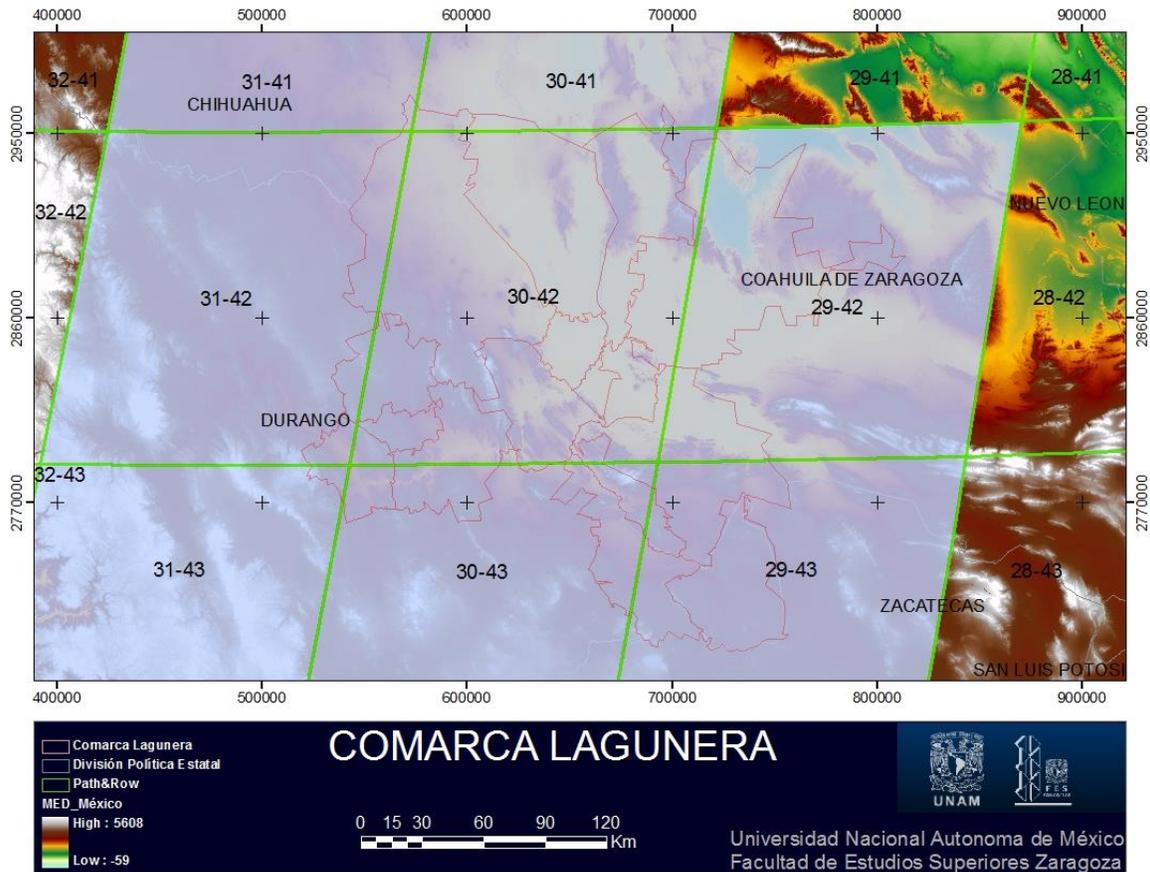


Figura 7. Path, Row del satélite LANDSAT 7 ETM +, correspondientes a la Comarca Lagunera.

En el portal del Sistema Geológico de los Estados Unidos (USGS), se seleccionaron imágenes del sensor MODIS TERRA, con un producto MOD13. Los datos MODIS los cuales son divididos en 5 niveles del grado de procesamiento MOD13 corresponden al nivel 3, que son productos de valor agregado derivado de variables geofísicas mapeadas, en algunos casos se realiza un remuestreo a una menor resolución espacial y se elaboran compuestos de intervalos de tiempo establecidos de 1, 8, 16 y 30 días. El MOD13 presenta dos índices de vegetación el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) y el

Índice de Vegetación Mejorado (EVI) (Colditz, *et al.*, 2011; García-Mora y Mas J. F, 2011. Los Productos de la superficie terrestre MODIS).

La imagen MODIS-TERRA MOD13 tiene un compuesto de 16 días, del 25 de mayo de 2009 fechas relacionadas al trabajo en campo, una resolución de 250m (Figura 8).

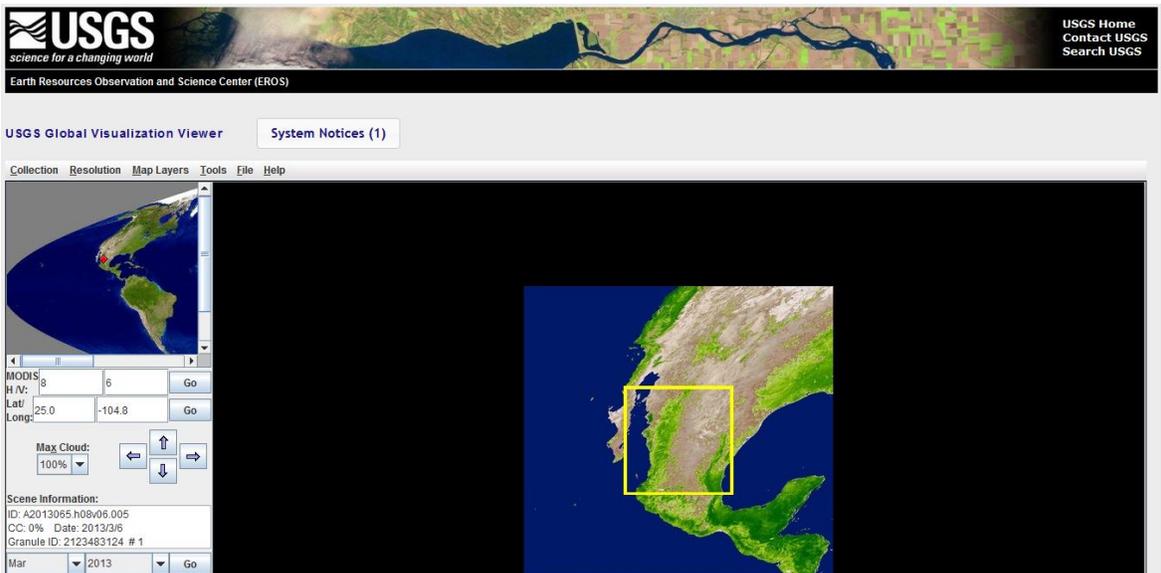


Figura 8. Portal del Sistema Geológico de los Estados Unidos (USGS), acceso libre a diferentes imágenes satelitales.

## 7.2.2. Procesamiento de las imágenes satelitales

En esta fase el procesamiento fue realizado con software especializado en el procesamiento digital de imágenes en percepción remota y sistemas de información geográfica, tales como: ENVI 4.8 y ARCGIS 9.3.

Las imágenes del satélite LANDSAT 7 sensor ETM 7 +, fueron procesadas con el software ENVI 4.8, las cuales se iniciaron con la georeferencia y edición de los metadatos para el despliegue de cada una de las ocho imágenes (Figura 9).

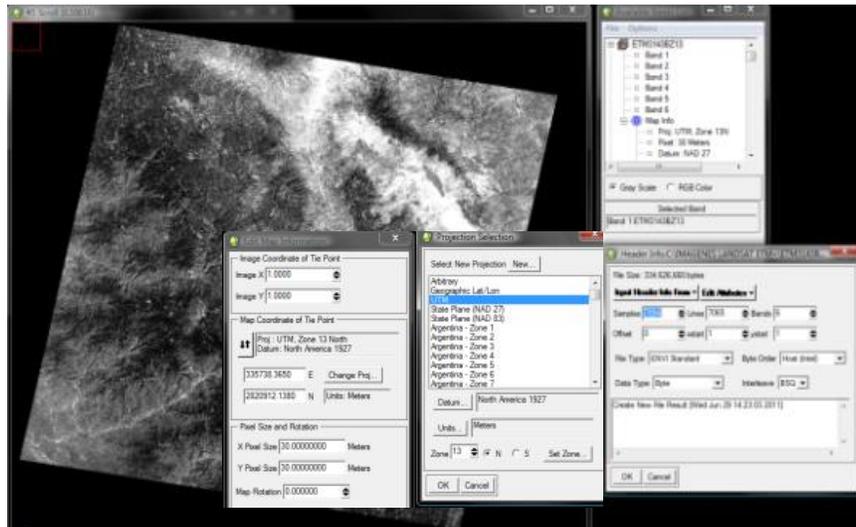


Figura 9. Edición del encabezado y despliegue de la imagen ETM3143BZ13 en el software ENVI 4.8.

Los metadatos de las imágenes satelitales están constituidos principalmente por la fecha de adquisición, filas y columnas que conforman la imagen, tipo de proyección, Datum-elipsoide, coordenadas extremas norte-sur, el tamaño de pixel entre otros parámetros, (ANEXO I). Al término del procesamiento de los metadatos, se realizó el despliegue de las imágenes se importaron los archivos con todas sus propiedades y listos para ser ensamblados, los cuales conformaron el mosaico de la zona de estudio (Figura 10). Ajustando los parámetros de sobre-posicionamiento, contrastes de las imágenes para obtener un mejor resultado.

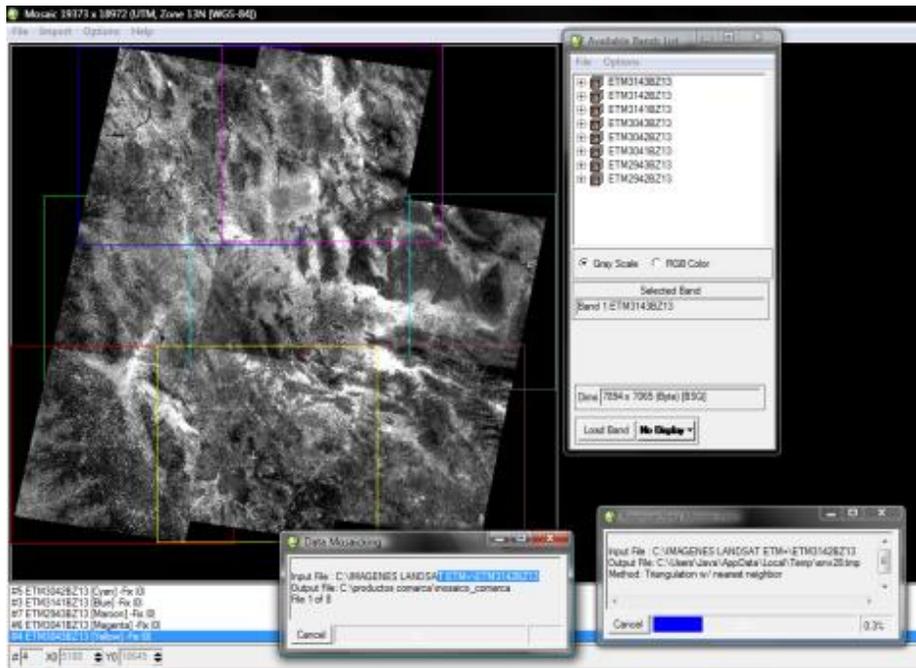


Figura 10. Procesamiento de las imágenes para conformar el mosaico de la zona de estudio.

Se obtuvo el mosaico con las imágenes seleccionadas, con los nuevos parámetros de proyección UTM zona 13, Datum WGS 84, se realizó un despliegue con la combinación de bandas espectrales 321 RGB o falso color para fines visuales (Figura 11).

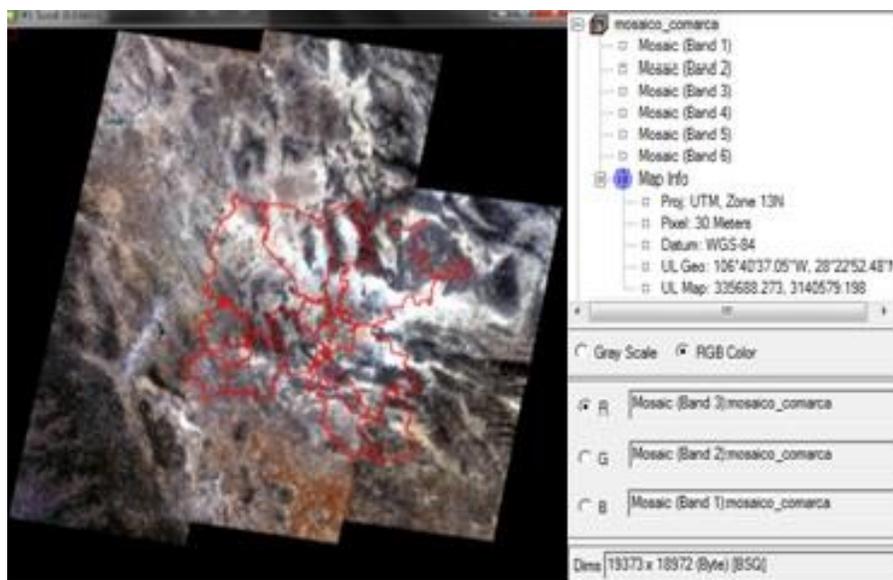


Figura 11. Obtención de mosaico y compuesto 321 RGB con el despliegue del polígono de la zona de estudio.

Se despliega el vector que contiene el archivo **zecl.shp** (zona \_ de \_ estudio \_ comarca \_ lagunera), el cual hace referencia a la poligonal que delimita a la zona de estudio, se realizó el recorte de la zona con fines de optimización de la información (Figura 12).

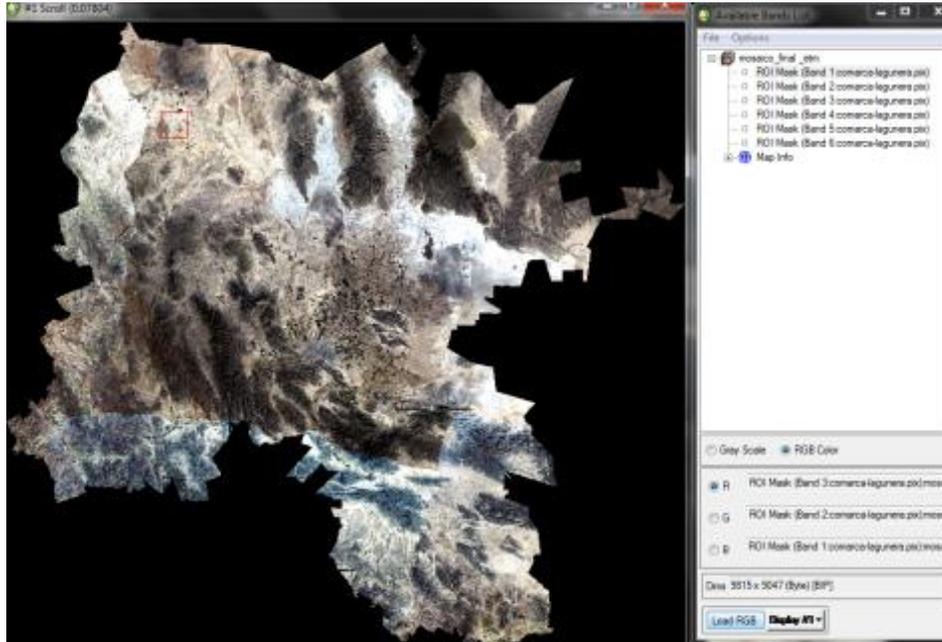


Figura 12. Compuesto 321 RGB y corte del mosaico LANDSAT 7 ETM +.

Las imágenes del sensor MODIS–TERRA fueron procesadas en el software ENVI 4.8 (Entorno para Visualización de Imágenes), este es un programa para el procesamiento de imágenes satelitales, proporcionando un análisis multispectral de los datos obtenidos desde plataformas satelitales o aéreas.

Se descriptó el archivo (MOD13Q1.A2009145.h08v06.005.2009167020648.hdf), teniendo una proyección de origen sinusoidal la cual se reprojectó a los parámetros de coordenadas geográficas con la proyección de latitud y longitud y (datum Clarke 1986), posteriormente se llevaron al sistema de coordenadas UTM (Figura 13).

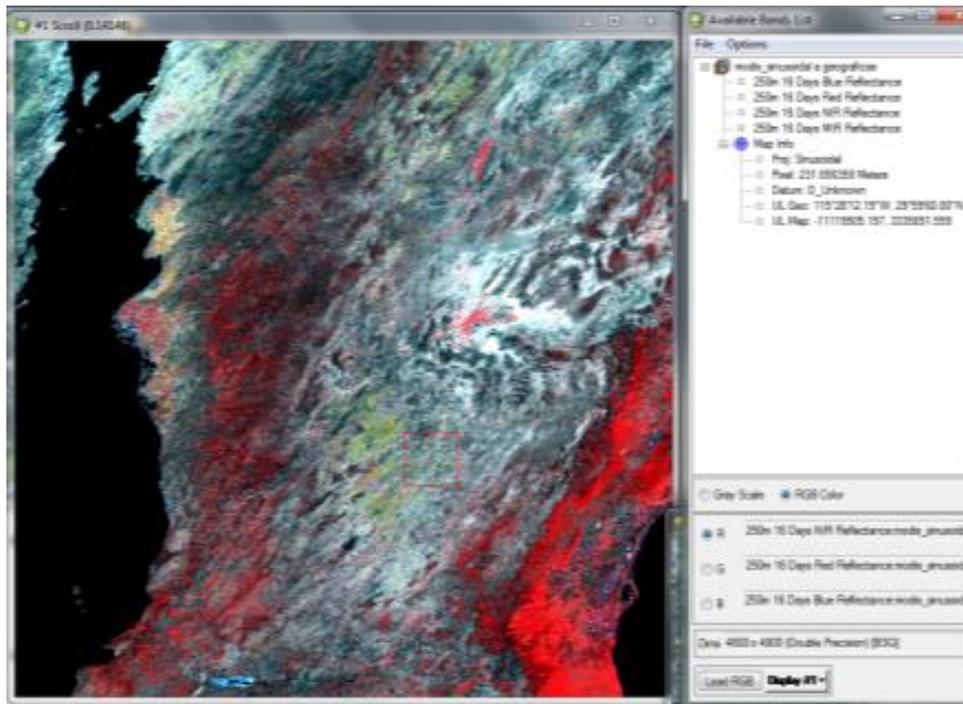


Figura 13. Compuesto de falso color en imagen MODIS con proyección sinusoidal.

Posteriormente se visualizó el vector que contiene el archivo **zecl.shp** (zona \_ estudio \_ comarca \_ lagunera.shp), para realizar el recorte de la zona de estudio (Figura 14).

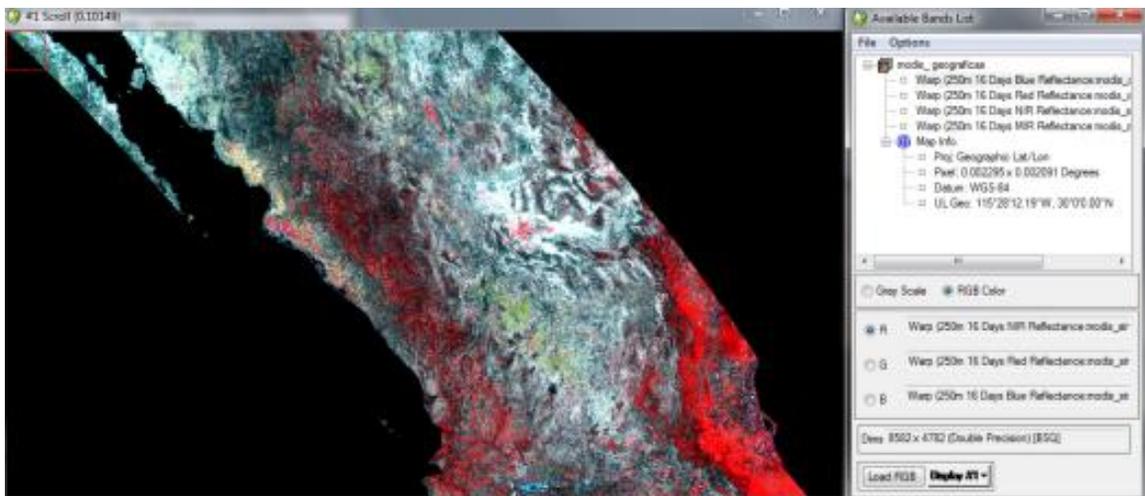


Figura 14. Compuesto de falso color en imagen MODIS con conversión al sistema de coordenadas geográficas, mostrando la sobre posición del polígono que comprende a la zona de estudio.

Se inició con el proceso de enmascarar la zona de estudio para su recorte con la herramienta (*SUBSET DATA/Basic Tools*) de ENVI, al final de se obtuvo la delimitación de la zona de estudio y se le asignaron el sistema de proyección UTM zona 13 con Datum WGS84 (Figura 15).

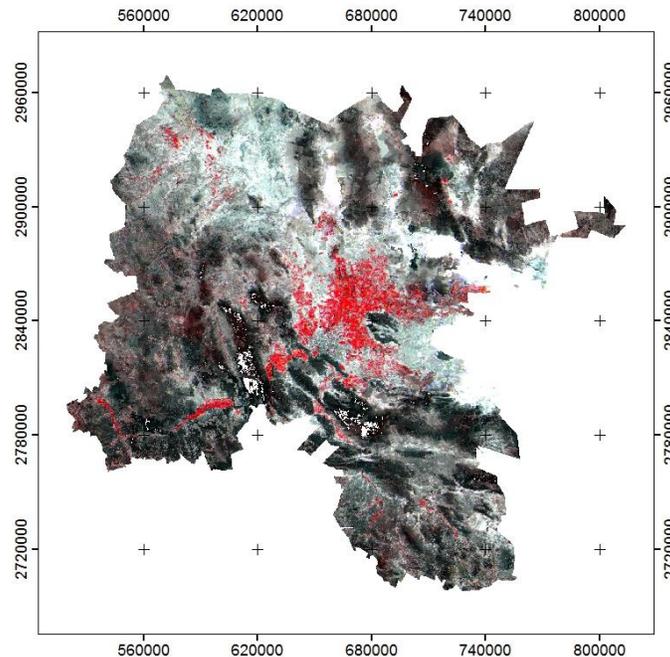


Figura 15. Compuesto de falso color 432 en imagen MODIS con la delimitación de la zona de estudio.

### 7.2.3 Obtención de firmas espectrales

La obtención de las firmas espectrales de la cobertura vegetal de la zona de estudio se basó primordialmente en la relación directa del inventario nacional forestal (Palacio-Prieto *et al.*, 2000), que proporcionó el Instituto de Geografía del año 2000, junto con la combinación de las bandas espectrales y generando un falso color en la imagen LANDSAT 7 ETM + y MODIS-TERRA (Figura 16), así obteniendo la clasificación mediante el módulo (*Profile Spectrum*) en el software ENVI 4.8 de los diferentes tipos de vegetación tal como:

1. Matorral micrófilo
2. Matorral rosetófilo
3. Matorral crasicaule
4. Matorral submontano
5. Zonas de riego
6. Pastizales
7. Mezquites
8. Chaparral
9. Vegetación gipsófila
10. Vegetación halófila
11. Vegetación de desiertos arenosos.

En este módulo se logró de manera puntual el dato de cada pixel relacionado con la vegetación descrita en el inventario nacional forestal (Figura 16)

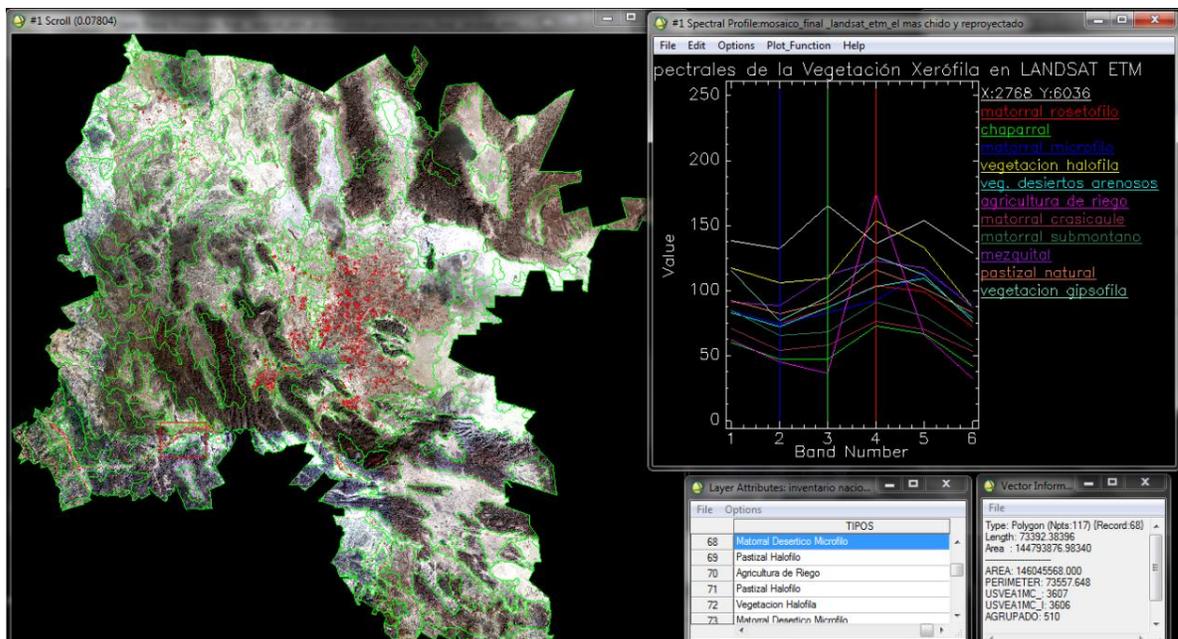


Figura 16. Perfiles espectrales de la vegetación en la imagen LANDSAT 7 ETM+ y MODIS-TERRA.

La obtención de los mapas de vegetación se realizó a través de las bandas espectrales, (verde, azul, roja y la del infrarrojo cercano), donde se calculan mediante el módulo (*Spectral/SPEAR Tool/Vegetation Delineation*) del software ENVI 4.8 (Figura 17). Este módulo es utilizado para zonas agrícolas principalmente, adaptándose a bosques y otros tipos de vegetación concentrándose en la eficiencia del crecimiento, estrés hídrico.

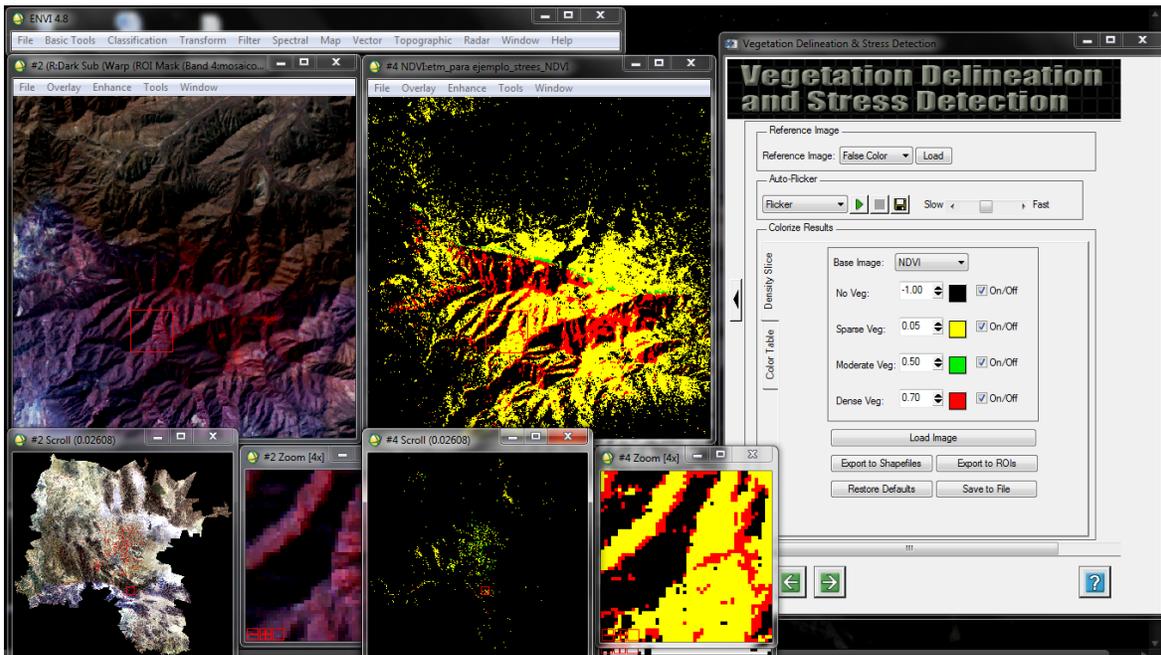


Figura 17. Vegetación detectada a través del módulo *Vegetation Delineation and Stress Detection*.

#### 7.2.4. Cálculo de los índices de vegetación

El cálculo del índice de vegetación NDVI sobre el mosaico de la imagen LANDSAT 7 ETM + y MODIS-TERRA, fue realizado con en el software ENVI, debido a que presenta una interfaz de cálculo y manejo en las opciones de (*Basic Tools*), donde se integraron al sistema la banda del infrarrojo cercano y la banda roja del visible y manualmente se integró al sistema la siguiente fórmula mediante la opción de (*Band Math*) (Figura 18).

$$NDVI = \frac{(IRc - Vis)}{IRc + Vis}$$

dónde: IRc = Banda del infrarrojo cercano

Vis = Banda del visible rojo

Obteniendo valores normalizados en un rango de -1 a 1. En cada una de las imágenes satelitales.

El cálculo del índice de vegetación SAVI sobre el mosaico de la imagen LANDSAT 7 ETM + y MODIS-TERRA, fue realizado de igual manera con ayuda de ENVI, ingresando las bandas del infrarrojo cercano y la banda del visible roja, añadiendo el factor de ajuste *l*, Huete *et al.*, (1988), sugiere tomar un valor igual a 1.0 para densidades de vegetación bajas, 0.5 para valores intermedios y 0.25 para vegetación densa, se usaron los valores del factor *l* de 0.5, 0.75 y 1.0, para poder determinar la mejor respuesta espectral que representó a la vegetación de la zona (Figura 18) y se integró al sistema la siguiente fórmula:

$$SAVI = \frac{(IRc - r)}{(IRc + r + l)} (1 + l)$$

dónde : IRc = Banda del infrarrojo cercano

r= Banda del visible rojo

*l* =Factor de constante

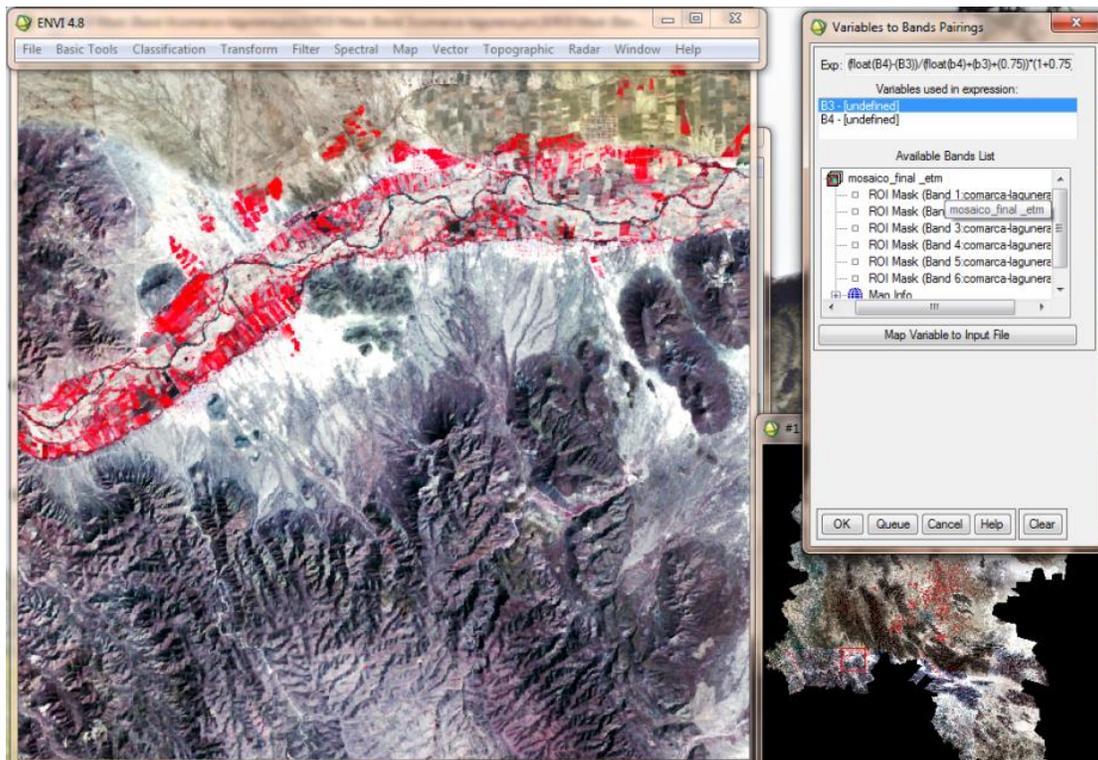


Figura 18. Cálculo de los índices NDVI y SAVI mediante el software ENVI 4.8.

### 7.3. Fase de campo

Esta fase consistió en un recorrido a la zona de estudio correspondiente a las fechas del 23 al 30 de mayo de 2009. Se realizó el reconocimiento fisionómico de las diferentes coberturas de vegetación en los 16 municipios que conforman a la Comarca Lagunera.

Se tomaron 18 puntos de caracterización fisionómica georreferenciados y alrededor de 38 puntos de referencia a la vegetación. Los puntos fueron seleccionados al azar debido a los alcances de los objetivos y fundamentalmente a los accesos de las vías de comunicación con los que se encuentran comunicados los 16 diferentes municipios que conforman a la llamada Comarca Lagunera y al tiempo establecido para el trabajo de campo.

Los puntos del Sistema de Posicionamiento Global GPS por sus siglas en inglés (Global Positioning System), fueron tomados con el modelo Garmin GPSMAP 60CSx.

### **7.3.1. Identificación fisionómica de la cobertura vegetal**

En esta etapa se realizó una visita a la zona de estudio, con apoyo del inventario forestal del Instituto de Geografía (Palacio-Prieto *et al.*, 2000), y mapas temáticos del INEGI como: mapas de vegetación y uso de suelo, mapas topográficos a escala 1:250 000, mapas de vías de comunicación (<http://gaia.inegi.org.mx/mdm5/viewer.html> ) y modelos de elevación de terreno (MED) (<http://www.jspacesystems.or.jp/ersdac/GDEM/E/1.html>).

Se utilizó el sistema de posicionamiento global (GPS), ubicando los sitios de verificación fisionómica de la vegetación natural de la Comarca Lagunera.

Se plantearon 18 puntos de caracterización fisionómica al azar con base a la accesibilidad de los caminos principalmente, por lo cual se consiguieron en cada punto de verificación la evaluación del porcentaje de cobertura vegetal para cada estrato, arbóreo, arbustivo y herbáceo, además de los diferentes tipos de matorrales (rosetófilo, xerófilo, crasicauale y micrófilo) las condiciones generales del sitio mediante un formato de caracterización ecológica elaborado *ex profeso* para tal fin, ANEXO II (Tabla 21).

## VIII. RESULTADOS

Se obtuvo la combinación RGB en color verdadero 321 y en falso color de las bandas 432 en LANDSAT ETM 7 +, para MODIS-TERRA, solo se obtuvo la combinación RGB 432 debido a la falta de la banda 1 (verde), como se muestran en las (Figura 19, 20 y 21).

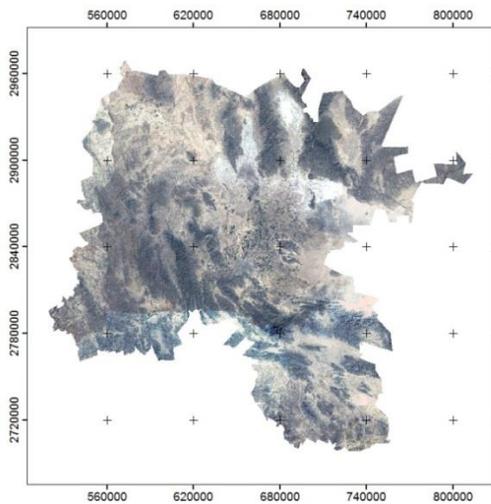


Figura 19. Compuesto RGB 321, sensor LANDSAT 7 ETM +.

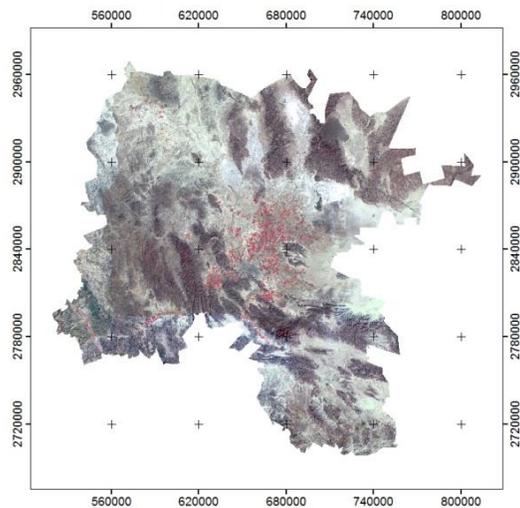


Figura 20. Compuesto RGB 432, sensor LANDSAT 7 ETM +.

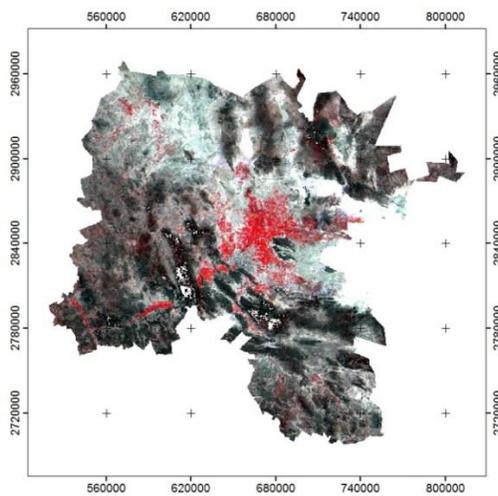


Figura 21. Compuesto RGB432, sensor MODIS-TERRA.

Se obtuvieron las firmas espectrales correspondientes a los diferentes tipos de vegetación presentes en la zona de estudio, tal como:

1. Matorral micrófilo
2. Matorral rosetófilo
3. Matorral crasicaule
4. Matorral submontano
5. Zonas de riego
6. Pastizales
7. Mezquites
8. Chaparral
9. Vegetación gipsófila
10. Vegetación halófila
11. Vegetación de desiertos arenosos.

Se obtuvo de manera puntual el dato de cada pixel relacionado con la vegetación relacionada del inventario nacional forestal, muestra el comportamiento típico de las curvas de vegetación en la reflectancia del infrarrojo cercano en las imágenes de satélite LANDSAT 7 ETM + y MODIS-TERRA (Figura 22 y 23).

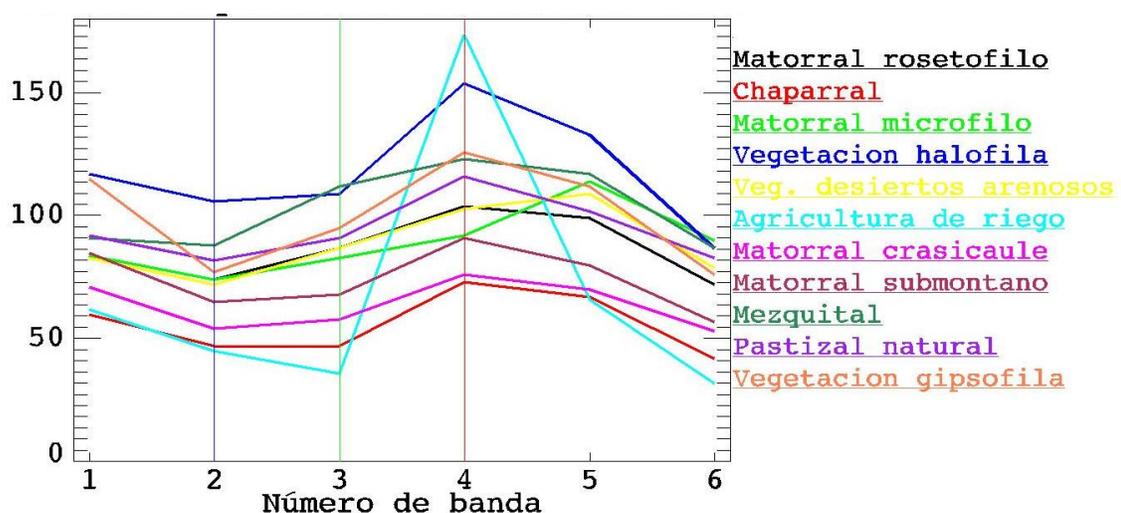


Figura 22. Firmas espectrales de la vegetación en la imagen satelital LANDSAT 7 ETM +.

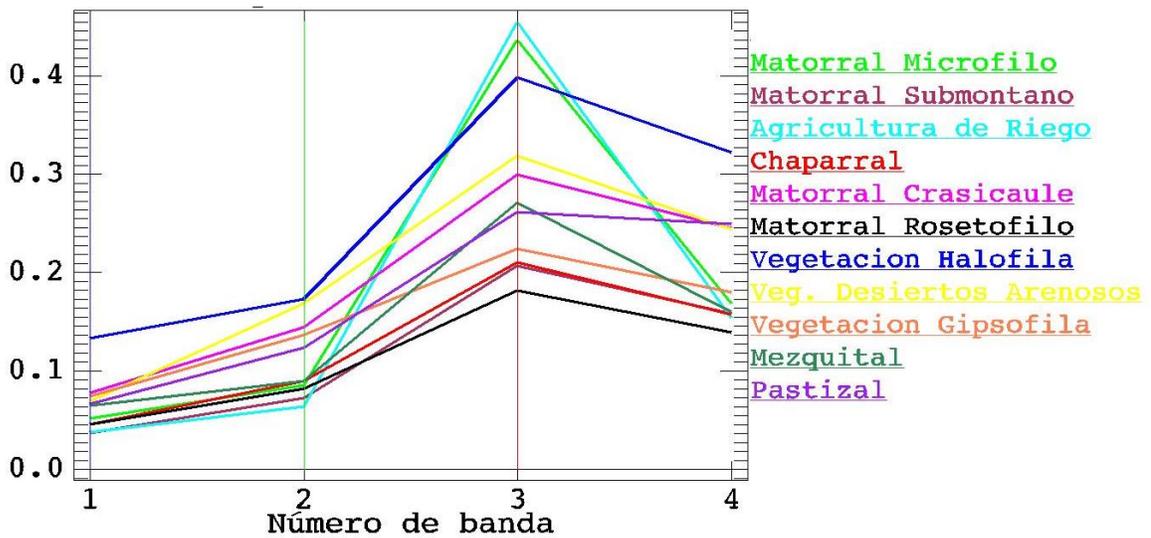


Figura 23. Firmas espectrales de la vegetación en la imagen satelital MODIS-TERRA.

La obtención del mapa de la delineación de la vegetación (Figura 24), fue a través de la combinación de las bandas espectrales (4321) y el perfil espectral que presenta la vegetación, sólo se empleó la metodología para la imagen del sensor LANDSAT 7 ETM +.

Los valores obtenidos a través del módulo (*vegetation delineation*), se concentran solo en tres rangos de valores, donde se establece:

- Vegetación densa = 0.51-0.70, representada en color rojo
- Vegetación moderada = 0.26-0.50, representada en color verde
- Vegetación dispersa = 0.01-0.25, representada en color amarillo

La vegetación xerófila activa detectada mediante el sensor LANDSAT 7 ETM + de la región se encuentra entre valores de 0.01-0.25, color amarillo, vegetación dispersa (Figura 24).

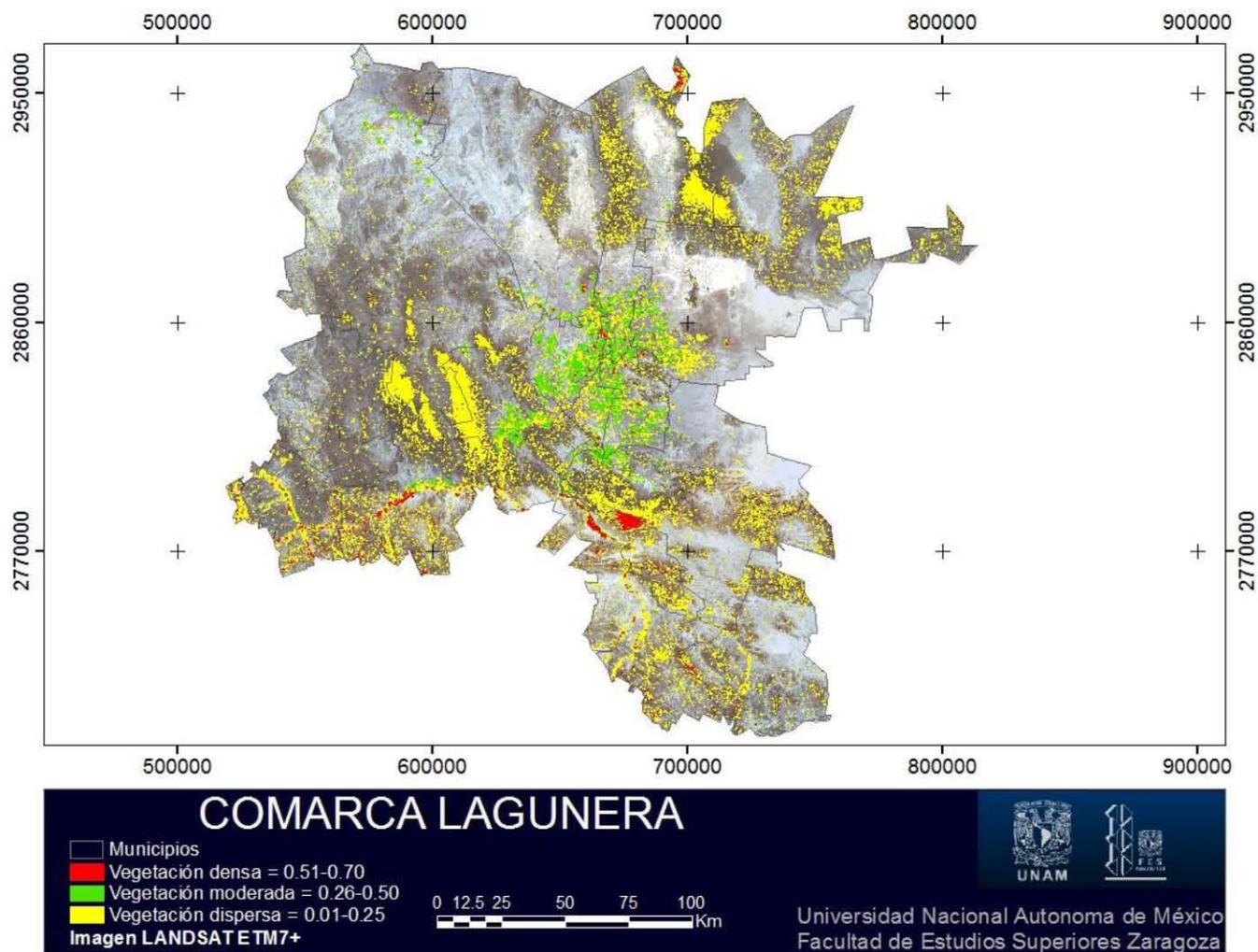


Figura 24. Mapa de la delineación de la vegetación de LANDSAT 7 ETM +.

Se obtuvo el índice de vegetación normalizado NDVI, (Rouse *et al.*, 1974) sostuvo que este índice oscila entre los valores -1 y 1, sin embargo en condiciones de densa vegetación puede saturarse, pero el rango común para la vegetación es de 0,2 a 0,8. (Figura 25 y 26), el índice de vegetación se calculó en las imágenes satelitales LANDSAT 7 ETM + y MODIS-TERRA.

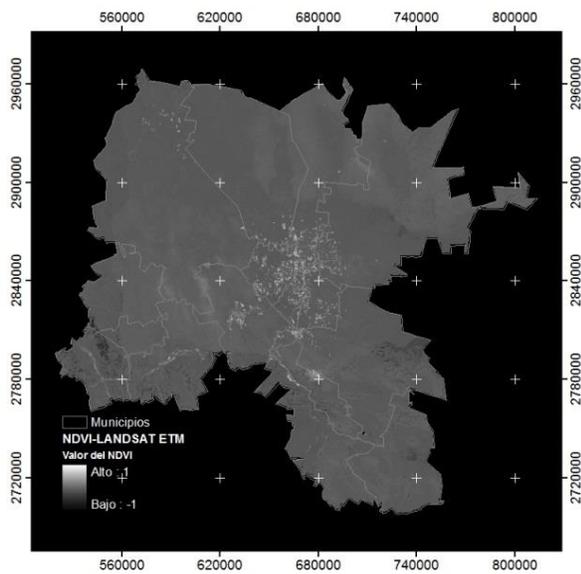


Figura 25. NDVI con LANDSAT 7 ETM +.

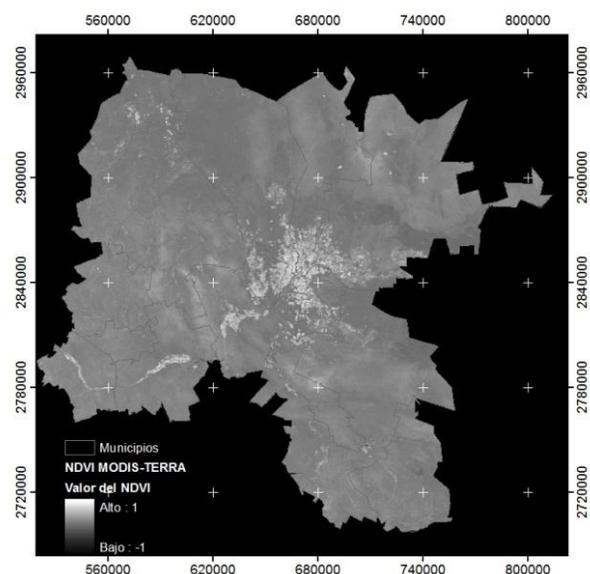


Figura 26. NDVI con MODIS-TERRA.

El índice de vegetación ajustado a la línea del suelo SAVI (Huete, *et al.*, 2011) oscila sus valores en condiciones adecuadas el rango común para la vegetación son valores positivos, mayores a los que presenta el NDVI, que se calcularon en las imágenes LANDSAT 7 ETM + y MODIS-TERRA con un factor  $l$  de 0.5 vegetación moderada, 0.75 vegetación dispersa y 1 para vegetación escasa (Figura 27 a la 32).

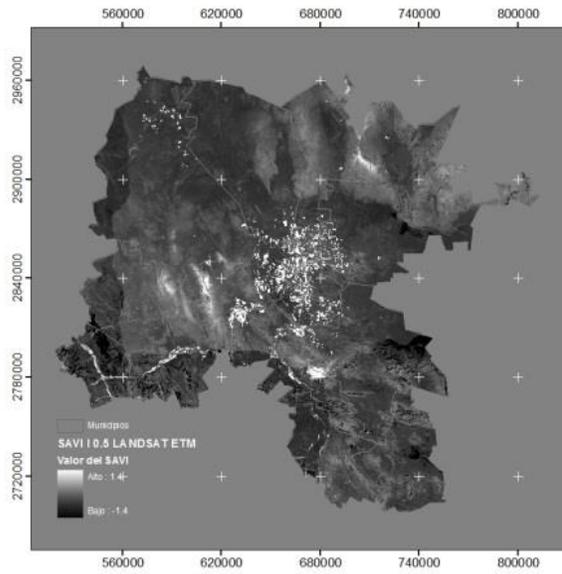


Figura 27. Producto SAVI con factor  $l$  de 0.5 en  
LANDSAT 7 ETM +.

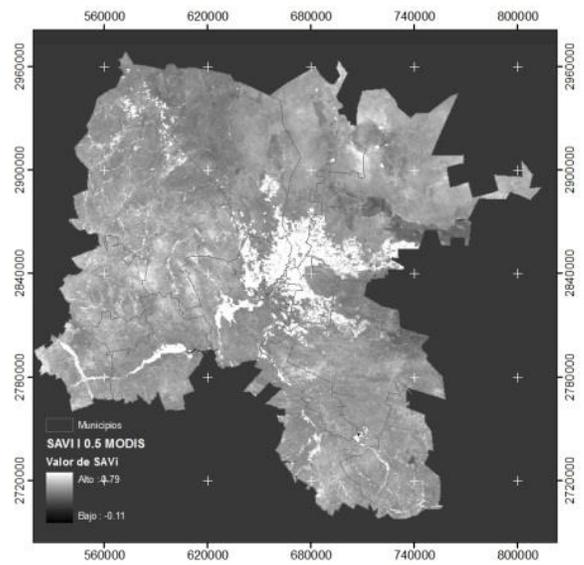


Figura 28. Producto SAVI con factor  $l$  de 0.5 en  
MODIS-TERRA.

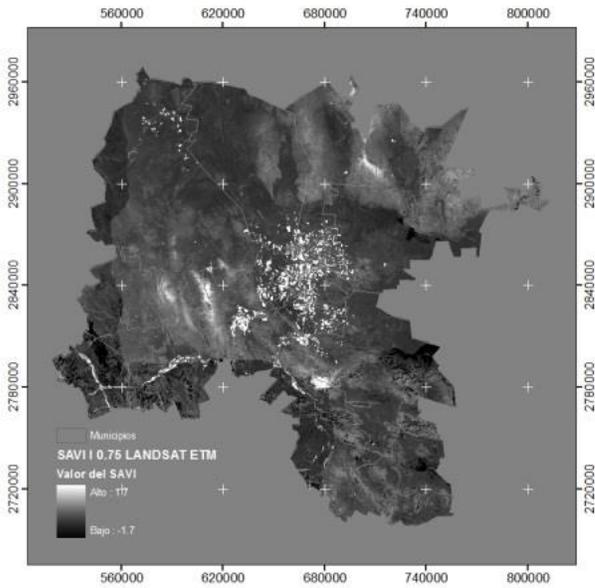


Figura 29. Producto SAVI con factor  $l$  de 0.75 en  
LANDSAT 7 ETM +.

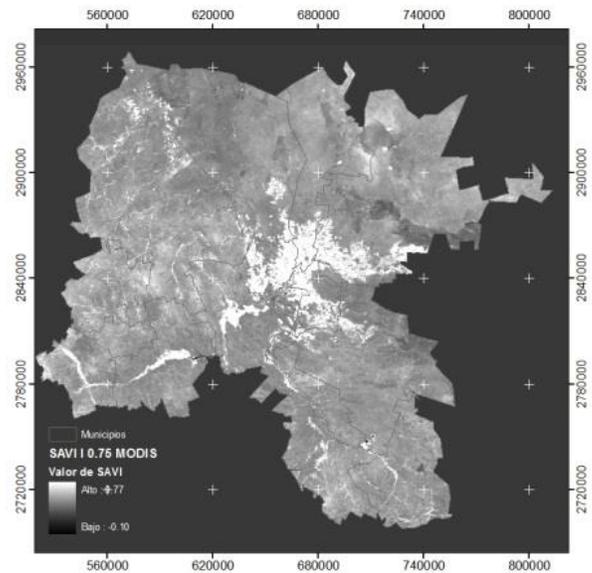


Figura 30. Producto SAVI con factor  $l$  de 0.75 en  
MODIS-TERRA.

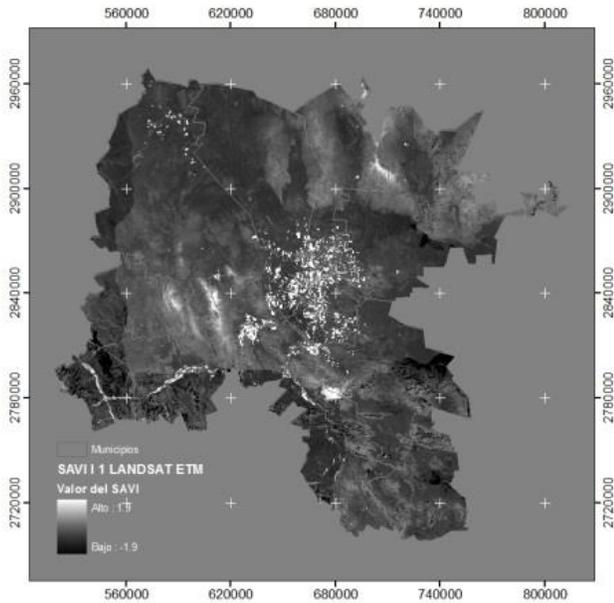


Figura 31. Producto SAVI con factor  $l$  de 1.0 de LANDSAT 7 ETM +.

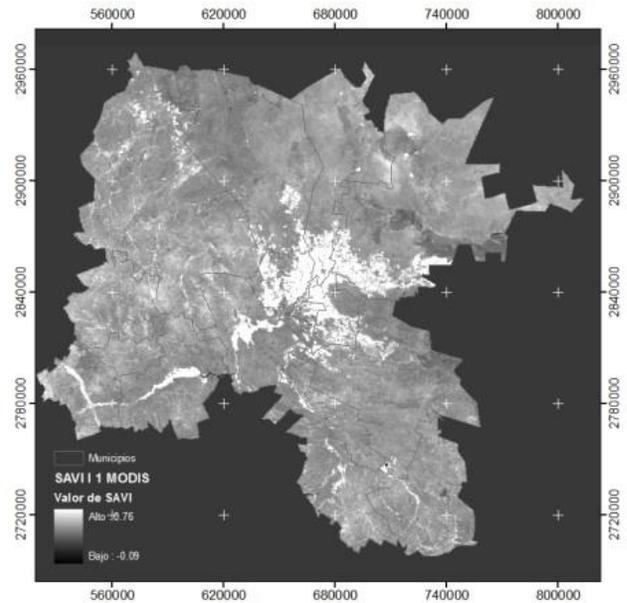


Figura 32. Producto SAVI con factor  $l$  de 1.0 en MODIS-TERRA.

En el procesamiento y cálculo de los índices de vegetación NDVI y SAVI se obtuvieron los siguientes resultados estadísticos.

Tabla 4. Estadística básica del índice de vegetación NDVI.

	NDVI			
	Mínimo	Máximo	Media	$\delta^2$
<b>LANDSAT 7 ETM +</b>	-0.98	0.98	-0.06	0.09
<b>MODIS TERRA</b>	-0.19	0.94	0.23	0.09

Tabla 5. Estadística básica del índice de vegetación SAVI con factor  $l$  de 0.5.

	<b>SAVI <math>l = 0.5</math></b>			
	Mínimo	Máximo	Media	$\delta^2$
<b>LANDSAT 7 ETM +</b>	-1.47	1.47	-0.05	0.11
<b>MODIS TERRA</b>	-0.11	0.79	0.06	0.08

Tabla 6. Estadística básica del índice de vegetación SAVI con factor  $l$  de 0.75.

	<b>SAVI <math>l = 0.75</math></b>			
	Mínimo	Máximo	Media	$\delta^2$
<b>LANDSAT 7 ETM +</b>	-1.71	1.72	-0.05	0.13
<b>MODIS TERRA</b>	-0.10	0.77	0.06	0.08

Tabla 7. Estadística básica del índice de vegetación SAVI con factor  $l$  de 1.0.

	<b>SAVI <math>l = 1.0</math></b>			
	Mínimo	Máximo	Media	$\delta^2$
<b>LANDSAT 7 ETM +</b>	-1.96	1.96	-0.06	0.15
<b>MODIS TERRA</b>	-0.09	0.76	0.06	0.078

Los diferentes valores de los índices de vegetación se muestran en ventanas para la comparación puntual en una comunidad de chaparral en LANDSAT 7 ETM + (Figura 33). El índice de vegetación con mayor valor digital fue el índice de vegetación SAVI con factor  $l$  de 1.0, el índice de vegetación NDVI resultó con el valor digital menor.

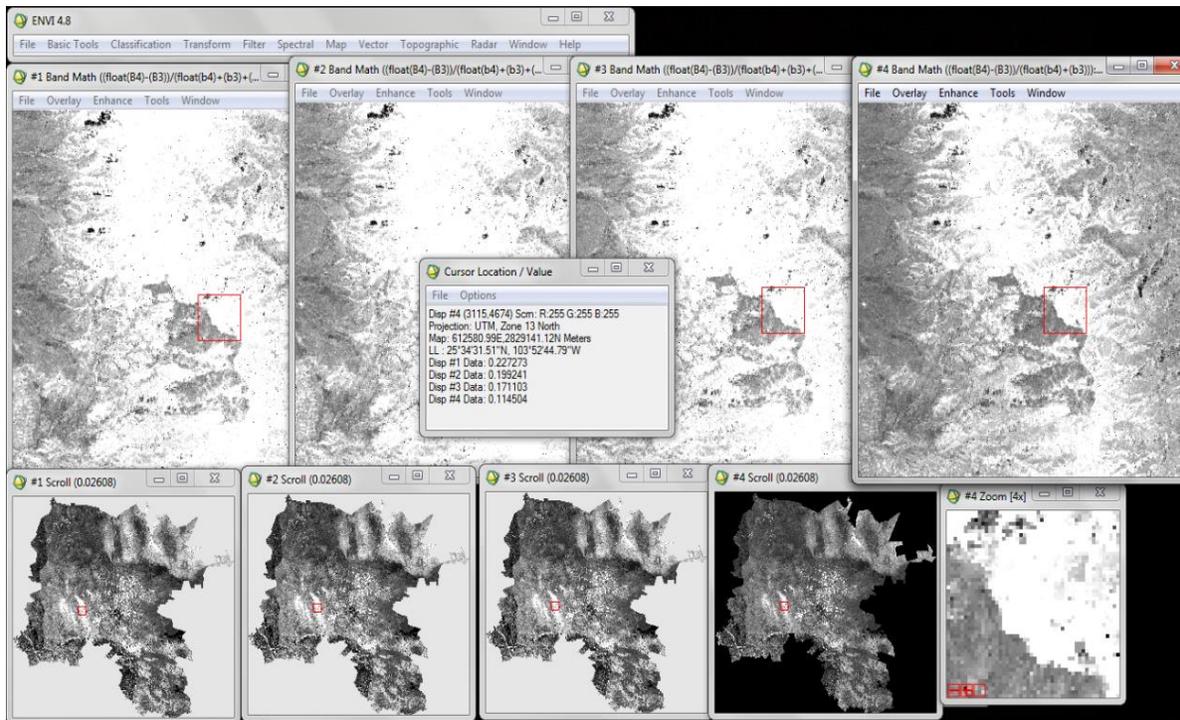


Figura 33. Valores espectrales de los índices de vegetación en LANDSAT 7 ETM +.

Tabla 8. Valores espectrales de los índices de vegetación en LANDSAT 7 ETM +.

Valores de los Índices de Vegetación en LANDSAT 7 ETM +				
Índice de Vegetación	Display 1	Display 2	Display 3	Display 4
SAVI con $l$ de 1.0	0.22			
SAVI con $l$ de 0.75		0.19		
SAVI con $l$ de 0.5			0.17	
NDVI				0.11

Los diferentes valores de los índices de vegetación obtenidos se despliegan para la comparación puntual en una comunidad de chaparral en MODIS-TERRA (Figura 34). El índice de vegetación con mayor valor digital fue el índice de vegetación NDVI, el índice de vegetación SAVI con factor  $l$  de 1.0 resultó con el valor digital menor.

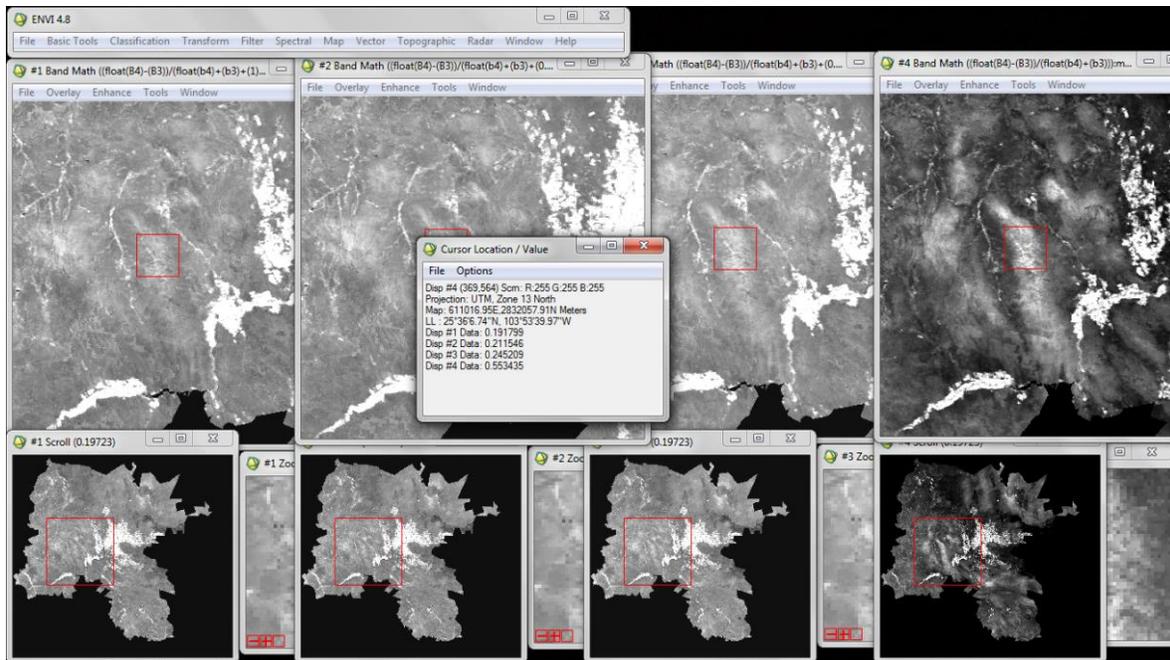


Figura 34. Valores espectrales de los índices de vegetación en MODIS-TERRA.

Tabla 9. Valores espectrales de los índices de vegetación en MODIS-TERRA.

Valores de los Índices de Vegetación en MODIS-TERRA				
Índice de Vegetación	Display 1	Display 2	Display 3	Display 4
SAVI con $l$ de 1.0	0.19			
SAVI con $l$ de 0.75		0.21		
SAVI con $l$ de 0.5			0.24	
NDVI				0.55

En la Tabla 12, se muestran los diferentes valores digitales obtenidos de las imágenes satelitales LANDSAT 7 ETM + y MODIS-TERRA, para cada uno de los puntos de caracterización fisionómica realizados en campo, obteniendo el cálculo de los 2 índices de vegetación NDVI y SAVI con el factor  $l$  de 0.5, 0.75 y 1.0., en ambas imágenes satelitales.

Tabla 10. Valores espectrales de los índices de vegetación en los puntos de caracterización fisionómica.

Puntos de caracterización Fisionómica	Coordenadas UTM		Altitud msnm	NDVI ETM	NDVI MODIS	SAVI $l = 0.5$ ETM	SAVI $l = 0.5$ MODIS	SAVI $l = 0.75$ ETM	SAVI $l = 0.75$ MODIS	SAVI $l = 1.0$ ETM	SAVI $l = 1.0$ MODIS	Tipo de vegetación (Inventario Nacional)	Especies dominantes
	X	Y											
1	690920	2820796	1105	-0.07	0.16	-0.11	0.14	-0.13	0.13	-0.15	0.13	Agricultura de riego	<i>Larrea tridentata</i> , <i>Prosopis glandulosa</i> y <i>Prosopis laevigata</i> .
2	712696	2814047	1104	-0.06	0.10	-0.10	0.08	-0.11	0.08	-0.13	0.07	Pastizal halófilo	<i>Larrea tridentata</i> , <i>Distichlis spicata</i> , <i>Flourensia cernua</i> y <i>Parthenium incanum</i> .
3	714067	2839722	1115	-0.10	0.13	-0.15	0.11	-0.18	0.11	-0.21	0.11	Vegetación Halófila	<i>Larrea tridentata</i> , <i>Distichlis spicata</i> , <i>Euphorbia antisiphilitica</i> género <i>Prosopis</i> .
4	716028	2868299	1097	-0.05	0.16	-0.07	0.12	-0.09	0.11	-0.10	0.10	Matorral micrófilo	Género <i>Prosopis</i> asociado con <i>Distichlis spicata</i> .
5	583792	2932813	1271	-0.09	0.12	-0.14	0.10	-0.17	0.10	-0.19	0.10	Agricultura de riego	<i>Larrea tridentata</i> , <i>Fouquieria splendens</i> , género <i>Prosopis</i> y <i>Opuntias</i> .
6	597381	2939676	1200	-0.07	0.14	-0.11	0.10	-0.13	0.09	-0.15	0.09	Matorral micrófilo	<i>Larrea tridentata</i> , <i>Castela texana</i> , <i>Euphorbia antisiphilitica</i> , <i>Distichlis spicata</i> , <i>Jatropha dioica</i> , <i>Koeberlinia spinosa</i> y género <i>Prosopis</i> , <i>Opuntia</i> y <i>Agave</i> .
7	622168	2860084	1220	-0.07	0.27	-0.10	0.20	-0.12	0.18	-0.14	0.18	Matorral micrófilo	<i>Larrea tridentata</i> , <i>Distichlis spicata</i> y géneros <i>Dasylyrion sp</i> , <i>Yucca spp</i> y <i>Prosopis</i> .
8	602392	2859859	1368	-0.06	0.19	-0.10	0.15	-0.12	0.14	-0.13	0.14	Matorral micrófilo	<i>Castela texana</i> , <i>Koeberlinia spinosa</i> , <i>Peniocereus greggii</i> , <i>Flourensia cernua</i> , <i>Stenocereus thurberi</i> y del género <i>Prosopis</i> , <i>Opuntia</i> , <i>Agave</i> y de la familia <i>Cactaceae</i> .
9	620399	2855744	1314	-0.06	0.28	-0.10	0.16	-0.12	0.14	-0.13	0.13	Matorral rosetófilo	<i>Agave aspérroma</i> , <i>Larrea tridentata</i> , <i>Dasylyrion wheeleri</i> , <i>Lippia graveolens</i> , <i>Cylindropuntia leptocaulis</i> , <i>Peniocereus greggii</i> , <i>Bursera microphylla</i> , <i>Fouquieria splendens</i> y del género <i>Prosopis</i> , <i>Agave Opuntia</i> y de la familia de las <i>Cactaceae</i> .
10	633122	2846672	1307	-0.04	0.23	-0.07	0.16	-0.08	0.15	-0.09	0.14	Matorral rosetófilo	<i>Larrea tridentata</i> , <i>Agave lechuguilla</i> , <i>Agave aspérroma</i> , <i>Cylindropuntia leptocaulis</i> , <i>Stenocereus thurberi</i> , <i>Peniocereus greggii</i> , <i>Bursera microphylla</i> , <i>Jatropha dioica</i> , <i>Koeberlinia spinosa</i> , <i>Fouquieria splendens</i> , y de la familia de las <i>Cactaceae</i> .
11	667879	2851229	1121	-0.05	0.38	-0.08	0.29	-0.09	0.27	-0.11	0.26	Agricultura de riego	<i>Fouquieria splendens</i> , <i>Agave lechuguilla</i> , <i>Agave aspérroma</i> , <i>Cylindropuntia leptocaulis</i> , <i>Stenocereus thurberi</i> ,

														<i>Euphorbia antisiphilitica, Jatropha dioica</i> y especies del género <i>Opuntia</i> y <i>Prosopis</i> .
<b>12</b>	619610	2838199	1300	-0.06	0.21	-0.09	0.14	-0.11	0.13	-0.13	0.12	<b>Matorral micrófilo</b>	<i>Larrea tridentata, Koeberlinia spinosa, Fouquieria splendens, Jatropha dioica, Euphorbia antisiphilitica, Dassylirion sp y Yucca spp, Dassylirion wheeleri, Cyllindropuntia leptocaulis, Stenocereus thurberi</i> , y especies del género <i>Opuntias</i> .	
<b>13</b>	585415	2804587	1405	-0.01	0.21	-0.01	0.12	-0.02	0.11	-0.02	0.10	<b>Agricultura de temporal</b>	<i>Yucca elata, Dassylirion spp, Dassylirion wheeleri, Fouquieria splendens, Agave lechuguilla, Larrea tridentata</i> y del género <i>Opuntias, Prosopis, Acacia</i> .	
<b>14</b>	564743	2820781	1654	-0.02	0.21	-0.03	0.14	-0.04	0.13	-0.04	0.12	<b>Matorral rosetófilo</b>	<i>Agave lechuguilla, Agave aspérrima, Jatropha dioica, Bursera microphylla, Lippia graveolens</i> y una gran variedad de especies del género <i>Opuntias Cyllindropuntia leptocaulis, Stenocereus thurberi, Fouquieria splendens</i> .	
<b>15</b>	539766	2812204	1674	-0.03	0.24	-0.05	0.15	-0.06	0.14	-0.07	0.13	<b>Matorral micrófilo</b>	<i>Fouquieria splendens, Larrea tridentata, Dassylirion spp, Yucca spp, Yucca elata, Dassylirion wheeleri, Euphorbia antisiphilitica, Lippia graveolens, Cyllindropuntia leptocaulis, Stenocereus thurberi, Agave lechuguilla</i> y <i>Agave aspérrima</i> .	
<b>16</b>	542611	2787510	1388	-0.10	0.27	-0.16	0.14	-0.19	0.12	-0.21	0.11	<b>Matorral micrófilo</b>	<i>Fouquieria splendens, Larrea tridentata, Dassylirion spp, Yucca spp, Dassylirion wheeleri, Lippia graveolens, Euphorbia antisiphilitica, Jatropha dioica, Peniocereus greggii, Flourensia cernua, Cyllindropuntia leptocaulis, Stenocereus thurberi, Agave lechuguilla, Agave aspérrima</i> y del género <i>Prosopis</i> .	
<b>17</b>	575546	2783425	1293	-0.10	0.2	-0.15	0.13	-0.18	0.11	-0.21	0.11	<b>Matorral rosetófilo</b>	<i>Taxodium mucronatum, Salix babylonica, Fouquieria splendens, Larrea tridentata, Dassylirion Yucca, Dassylirion wheeleri, Euphorbia antisiphilitica, Lippia graveolens, Cyllindropuntia leptocaulis, Stenocereus thurberi</i> y del género <i>Prosopis</i> .	
<b>18</b>	648249	2728049	1890	0	0	0	0	0	0	0	0	<b>Pastizal natural</b>	<i>Larrea tridentata, Dassylirion spp y Yucca spp, Dassylirion wheeleri, Euphorbia antisiphilitica, Jatropha dioica, Cyllindropuntia leptocaulis, Stenocereus thurberi</i> .	

Los resultados obtenidos con el índice de vegetación NDVI, para cada uno de los puntos de caracterización fisionómica en cada una de las imágenes satelitales, se muestra la tendencia de los índices en la (Figura 35).

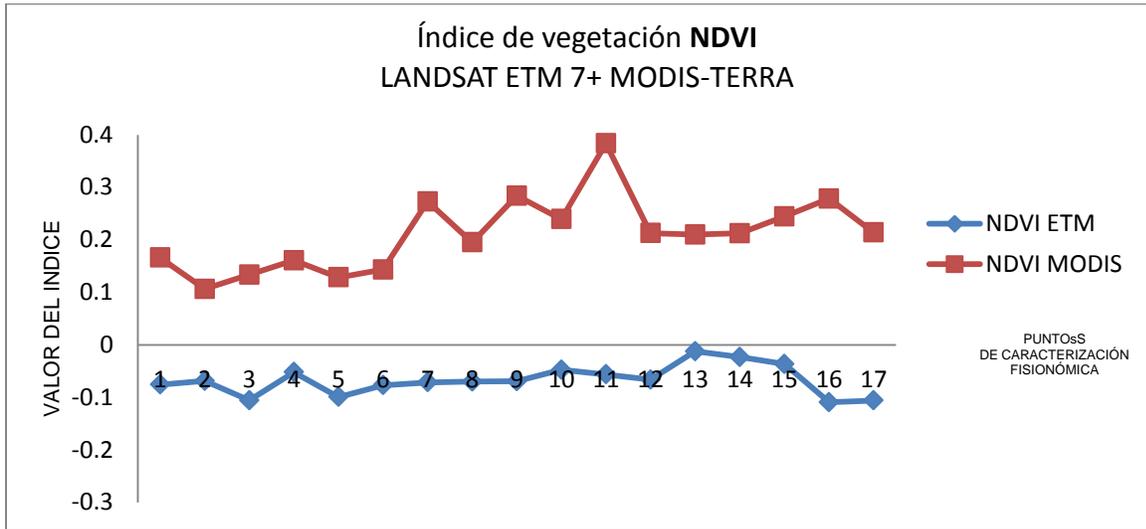


Figura 35. Valores del NDVI en los puntos de caracterización para cada imagen satelital.

Los resultados obtenidos del índice de vegetación SAVI con factor  $l$  de 0.5, para cada uno de los puntos de caracterización fisionómica en las imágenes satelitales, se muestra la tendencia del índice en la (Figura 36).

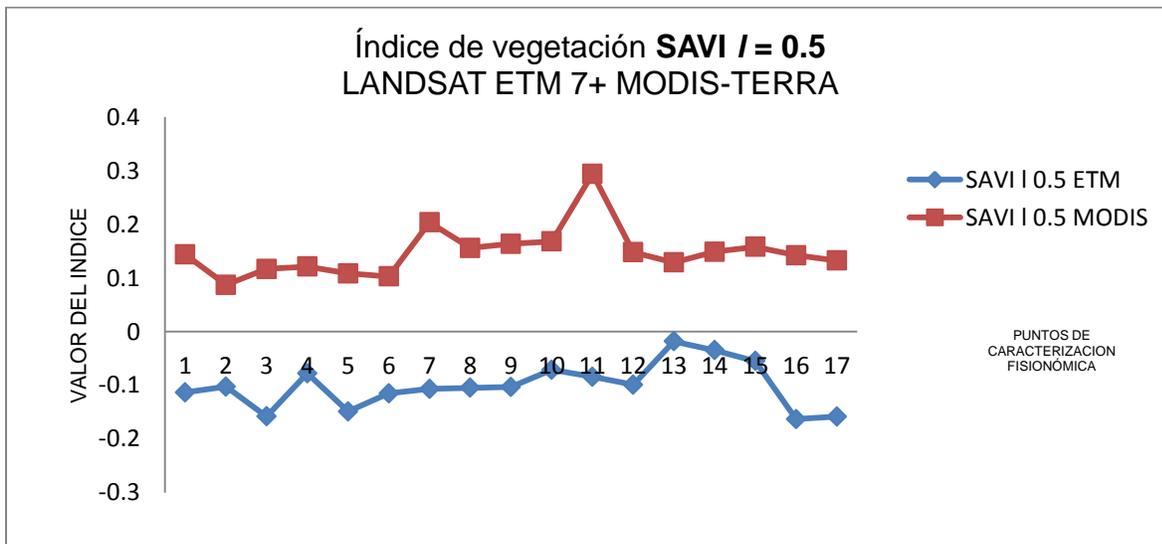


Figura 36. Valores del SAVI con factor  $l$  de 0.5 en los puntos de caracterización para cada imagen satelital.

Los resultados obtenidos del índice de vegetación SAVI con factor  $l$  de 0.75, para cada uno de los puntos de caracterización fisionómica en las imágenes satelitales, se muestra la tendencia del índice en la (Figura 37).

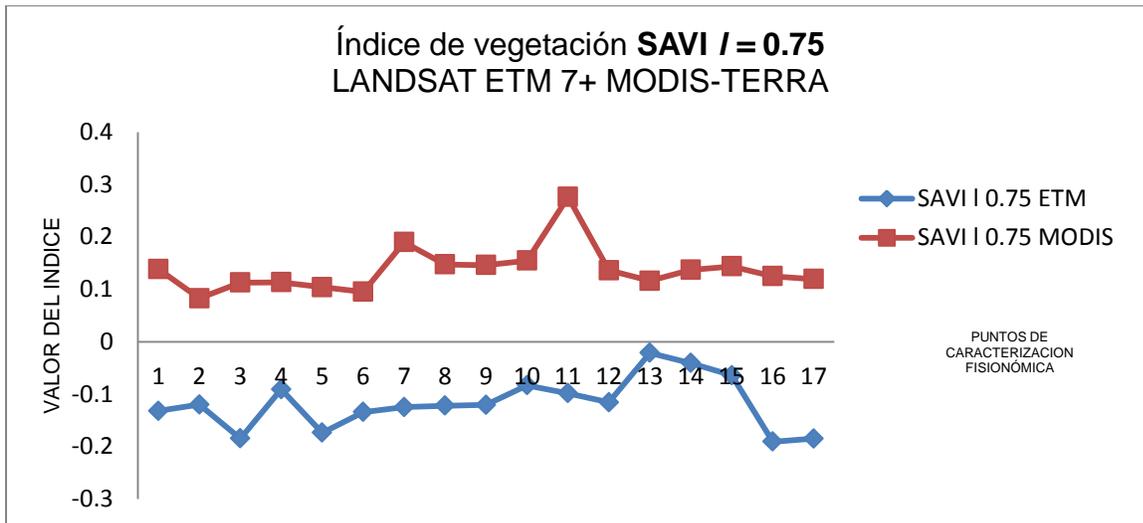


Figura 37. Valores del SAVI con factor  $l$  de 0.75 en los puntos de caracterización para cada imagen satelital.

Los resultados obtenidos del índice de vegetación SAVI con factor  $l$  de 1.0, para cada uno de los punto de caracterización fisionómica en las imágenes satelitales, donde se muestra la tendencia del índice de vegetación como se muestra en la (Figura 38).

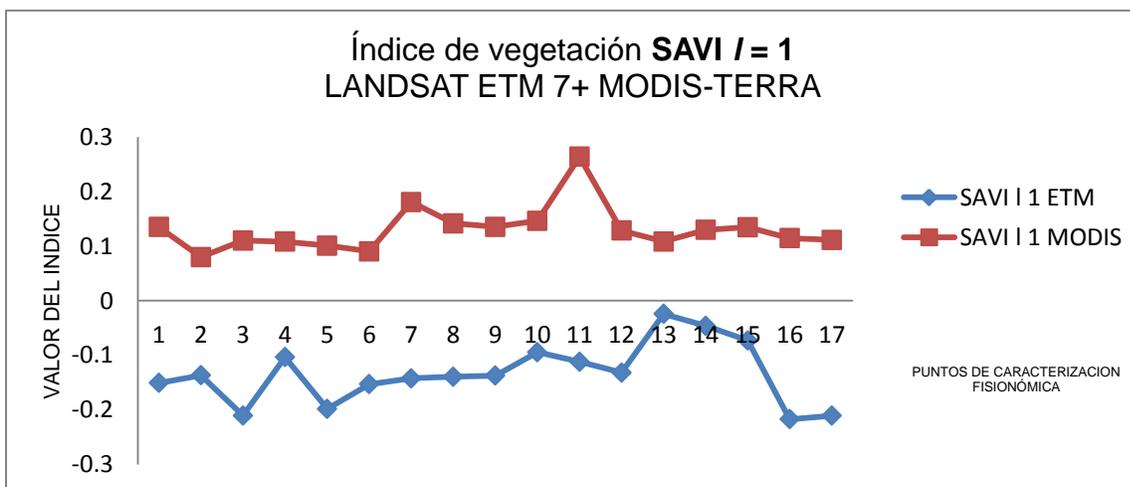


Figura 38. Valores del SAVI con factor  $l$  de 1.0 en los puntos de caracterización para cada imagen satelital.

Resumen de la tendencia de cada punto de caracterización fisionómica indicando el valor de los índices de vegetación, en las imágenes satelitales LANDSAT 7 ETM + y MODIS-TERRA (Figura 39).

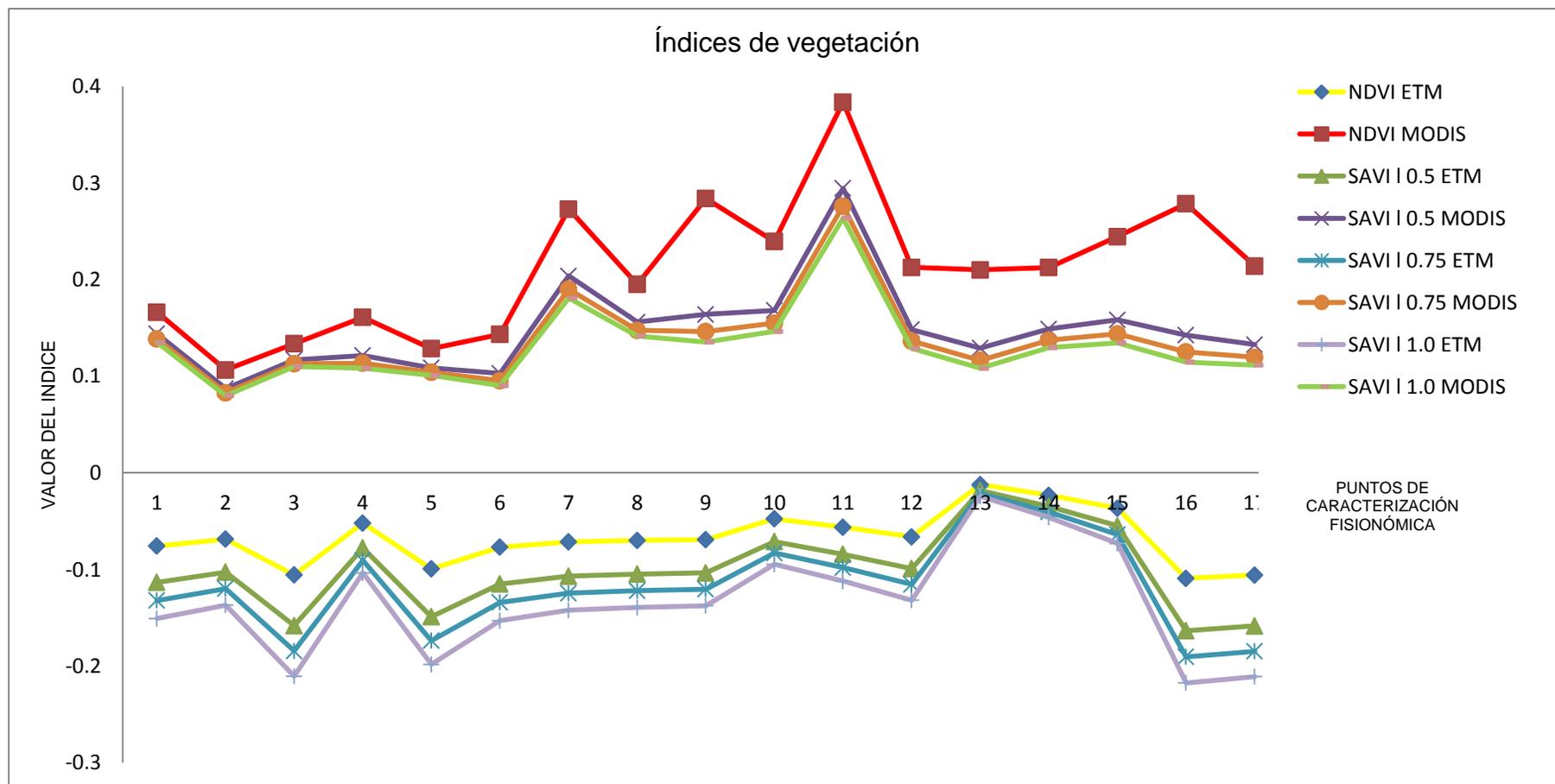


Figura 39. Índices de vegetación para cada punto de caracterización fisionómica aplicada en las imágenes satelitales.

En campo se verificaron 18 puntos georeferenciados que engloban las diferentes asociaciones vegetales, los cuales se muestran en el mapa (Figura 40), describiéndose a continuación:

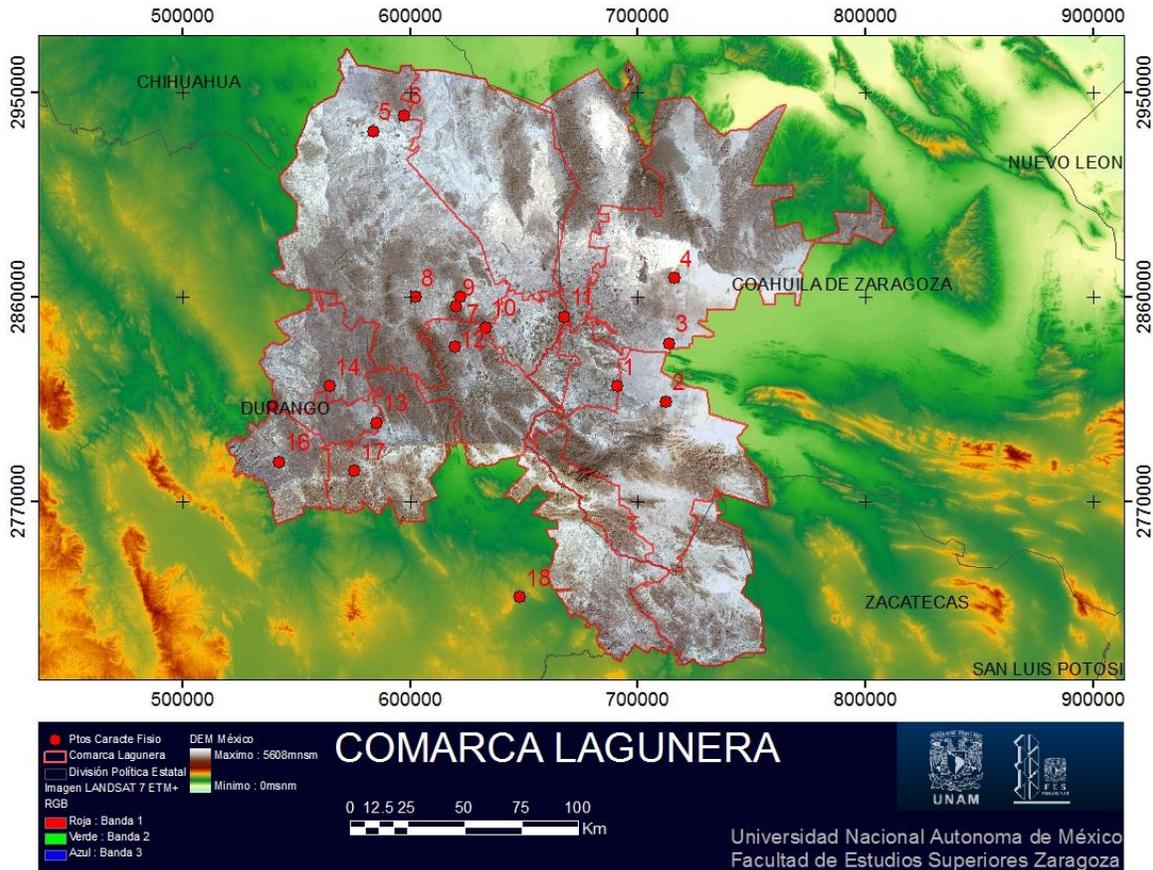


Figura 40. Mapa de puntos de caracterización fisionómica en la Comarca Lagunera.

Punto 1. Se ubica en las coordenadas UTM x 690920 y 2820796, a una altitud de 1105 msnm., a los alrededores del municipio de Matamoros y Viesca Coahuila, frente a la Sierra Cueva del Tabaco en la localidad del Fierro dónde se realizó la caracterización fisionómica del sitio (Figura 41). La zona se caracteriza por la dominancia del genero *Acacia* (huisache) y del género *Prosopis* (mezquite) donde coexisten las especies arbóreas *Prosopis glandulosa* y *Prosopis laevigata*, con individuos aislados de *Larrea tridentata* (gobernadora), que es una planta arbustiva perene. En el sitio se observa perturbación a consecuencia de la agricultura de

temporal, otro factor es la erosión que existe en el lugar, se percibe a simple vista las geomembranas utilizadas en las siembras. En la actualidad se observa una regeneración natural del *Prosopis laevigata* y *Prosopis globulosa*, los lugareños aprovechan esta especie para la elaboración del carbón de mezquite. Los valores espectrales de los índices de vegetación en las imágenes satelitales correspondientes a este punto se muestran en la Tabla 10.

Punto 2. Se ubica en las coordenadas UTM x 712696 y 2814047, a una altitud de 1104 msnm., en el municipio de Viesca en la localidad de Villa de Bilbao Coahuila en una zona de dunas de arena, la vegetación presente en estas 50 hectáreas está compuesta por especies como: *Larrea tridentata* (gobernadora), *Distichlis spicata* (pasto salado), *Flourensia cernua* (hojasen), *Parthenium incanum* (mariola) y del género *Prosopis spp* (mezquite), *Casuarina equisetifolia* como especie exótica (Figura 42). Esta zona resulta ser un atractivo turístico implementado recientemente, a simple vista se puede observar una gran diversidad fauna natural entre ellos la de reptiles e insectos. Los valores espectrales de los índices de vegetación en las imágenes satelitales correspondientes a este punto se muestran en la Tabla 10.

Punto 3. Se ubica en las coordenadas UTM x 714067 y 2839722, a una altitud de 1115 msnm., en la localidad de Mayrán en el municipio de San Pedro de las Colonias, Coahuila, valle somero extremadamente seco donde prácticamente la vegetación se reduce a las especies *Larrea tridentata* (gobernadora), que es la especie dominante y a *Distichlis spicata* (zacate). En épocas de lluvias se puede realizar actividades de pesca según los pobladores en la laguna de Mayran a unos 5 km del punto, se establecen comunidades bien definidas de *Prosopis* (mezquite), *Euphorbia antisiphilitica* (candelilla), y *Distichlis spicata* (zacate) especie indicadora de suelos salinos, la vegetación en esta zona es poco aprovechable (Figura 43). Los valores espectrales de los índices de vegetación en las imágenes satelitales correspondientes a este punto se muestran en la Tabla 10.

Punto 4. Se ubica en las coordenadas UTM x 716028 y 2868299, a una altitud de 1097 msnm., a 5 km adentrados a el poblado Puerto de Ventanillas, Coahuila sobre la carretera federal 30 con dirección a Cuatro Ciénegas, alojado en un valle somero, con suelos altamente limosos y altas

temperaturas, al norte encontramos la sierra de las delicias, en esta área predomina el género *Prosopis* asociado con *Distichlis spicata* (zacate), se aprecia que *Prosopis* spp (mezquite) es aprovechado para producir carbón (Figura 44). Los valores espectrales de los índices de vegetación en las imágenes satelitales correspondientes a este punto se muestran en la Tabla 10.

Punto 5. Se ubica en las coordenadas UTM x 583792 y 2932813, a una altitud de 1271 msnm., en el límite de las localidades del Diamante y San Agustín en el municipio de Ceballos Mapimí Durango, al NE sobre la ladera, donde predomina las especies *Larrea tridentata* (gobernadora), *Fouquieria splendens* (ocotillos), y una gran diversidad del género *Opuntia*, en las partes bajas grandes extensiones de *Prosopis* (mezquite), y cultivos de temporal (Figura 45). En la zona se observa gran actividad antropogénica, dada por caminos de terracería, cultivos, ganado, infraestructura eléctrica lo que reduce y fragmenta en gran porcentaje a la flora nativa del lugar. Los valores espectrales de los índices de vegetación en las imágenes satelitales correspondientes a este punto se muestran en la Tabla 10.

Punto 6. Se ubica en las coordenadas UTM x 597381 y 2939676, a una altitud de 1200 msnm., en la división política que define a la Reserva de la Biosfera de Mapimí Durango, sobre las escorrentías que dan origen a este valle donde se localiza el Laboratorio del Desierto del Instituto de Ecología Gobierno del Estado de Durango, hacia el NW se localiza la zona del silencio lugar según los investigadores del laboratorio como normal (Figura 46). La vegetación representativa de este lugar es el matorral micrófilo, donde *Larrea tridentata* (gobernadora) es la especie dominante de la zona seguida de *Prosopis* (mezquite) *Castela texana* (chaparro amargo), *Euphorbia antisyphilitica* (candelilla), *Jatropha dioica* (sangre de grado), *Koeberlinia spinosa* (corona de Cristo) y especies de los género *Opuntia* y *Agave*. Los valores espectrales de los índices de vegetación en las imágenes satelitales correspondientes a este punto se muestran en la Tabla 10.

Punto 7. Se ubica en las coordenadas UTM x 622168 y 2860084, a una altitud de 1220 msnm., en la localidad de Bermejillo en el municipio de Mapimí Durango, con dirección a la cabecera

municipal sobre la ladera Sur del cerro donde se aprecia que la vegetación se encuentra en regeneración es una comunidad donde predominan los géneros *Dasyllirion spp*, *Yucca spp* (izotales), asociados con *Larrea tridentata* (gobernadora) y *Prosopis spp* (mezquite) en las zonas bajas al igual que *Distichlis spicata* (zacate) y algunos individuos aislados de los género *Opuntia* y *Agave* (Figura 47). Los valores espectrales de los índices de vegetación en las imágenes satelitales correspondientes a este punto se muestran en la Tabla 10.

Punto 8. Se ubica en las coordenadas UTM x 602392 y 2859859, a una altitud de 1368 msnm., a 500 metros de la carretera 30 el Palmito en el municipio de Mapimí Durango, la vegetación dominante es del género *Prosopis* (mezquite), mezclada con los género *Opuntia*, *Agave*, y familia *Cactaceae*. *Castela texana* (chaparro amargo) y *Koeberlinia spinosa* (corona de Cristo), *Peniocereus greggii* (reina de la noche), *Flourensia cernua* (hojasen), y *Stenocereus thurberi* (pitaya), existiendo pastoreo moderado debido a los asentamientos humanos (Figura 48). Los valores espectrales de los índices de vegetación en las imágenes satelitales correspondientes a este punto se muestran en la Tabla 10.

Punto 9. Se ubica en las coordenadas UTM x 620399 y 2855744, a una altitud de 1314 msnm., en la localidad de Ojuela en el municipio de Mapimí Durango, sobre las escorrentías de la sierra, en la cobertura vegetal predomina las especies: *Larrea tridentata* (gobernadora), *Agave aspérrima* (maguey cenizo), *Dasyllirion wheeleri* (sotol), *Lippia graveolens* (orégano mexicano), *Cylindropuntia leptocaulis* (tasajillo), *Peniocereus greggii*, (reina de la noche), *Bursera microphylla* (copal), *Fouquieria splendens* (ocotillo), los géneros *Prosopis* (mezquites), *Agave*, *Opuntia*, *Dasyllirion*, *Yucca* (izotales) y la familia *Cactaceae*, son especies predominantes en la región, se caracteriza por ser una zona ex-minera y siendo actualmente una zona activa en el ámbito ecoturístico (Figura 49). Los valores espectrales de los índices de vegetación en las imágenes satelitales correspondientes a este punto se muestran en la Tabla 10.

Punto 10. Se ubica en las coordenadas UTM x 633122 y 2846672, a una altitud de 1307 msnm., en el municipio de Gómez-Palacio en la localidad del Diamante Durango, sobre las escorrentías de la Sierra de la Sarosa, donde la cobertura vegetal se compone principalmente por las especies

dominantes como *Larrea tridentata* (gobernadora), *Agave lechuguilla*, *Agave aspérrima* (maguey cenizo), *Cylindropuntia leptocaulis* (tasajillo), *Stenocereus thurberi* (pitaya), *Peniocereus greggii* (reina de la noche), *Bursera microphylla* (copal), *Jatropha dioica* (sangre de grado), *Koeberlinia spinosa* (corona de Cristo) y *Fouquieria splendens* (ocotillo). La actividad principal de la región se concentra en la cantera (Figura 50). Los valores espectrales de los índices de vegetación en las imágenes satelitales correspondientes a este punto se muestran en la Tabla 10.

Punto 11. Se ubica en las coordenadas UTM x 667879 y 2851229, a una altitud de 1121 msnm., en el municipio de Tlalhuilio de Zaragoza en la localidad de San Martín, se encuentran especies tales como; *Fouquieria splendens* (ocotillo), *Agave lechuguilla*, *Agave aspérrima* (maguey cenizo), *Cylindropuntia leptocaulis* (tasajillo), *Stenocereus thurberi* (pitaya), *Euphorbia antisyphilitica* (candelilla), *Jatropha dioica* (sangre de grado), y gran variedad de especies de los géneros *Opuntia* y *Prosopis* (mezquite). La zona presenta actividad antropogénica, resaltando los asentamientos ganaderos, avícolas y agrícolas, se observa degradación moderada de pastoreo (Figura 51). Los valores espectrales de los índices de vegetación en las imágenes satelitales correspondientes a este punto se muestran en la Tabla 10.

Punto 12. Se ubica, en las coordenadas UTM x 619610 y 2838199, a una altitud de 1300 msnm, en la localidad de Vicente Suárez en el municipio de Gómez-Palacio Durango. En la cobertura vegetal predominan; *Larrea tridentata* (gobernadora), *Koeberlinia spinosa* (corona de Cristo), *Fouquieria splendens* (ocotillo), *Jatropha dioica* (sangre de grado), *Euphorbia antisyphilitica* (candelilla), *Dasyllirion spp* y *Yucca spp* (izotales), *Dasyllirion wheeleri* (sotol), *Cylindropuntia leptocaulis* (tasajillo), *Stenocereus thurberi* (pitaya), y especies del género *Opuntia* (Figura52), una zona con gran diversidad en flora y fauna. Los valores espectrales de los índices de vegetación en las imágenes satelitales correspondientes a este punto se muestran en la Tabla 10.

Punto 13. Se ubica en las coordenadas UTM x 585415 y 2804587, a una altitud de 1405 msnm., en la localidad de San Lorenzo del municipio de San Luis Cordero Durango, cerca de la estación

de microondas (EMO) sobre las escorrentías de la sierra, la cobertura vegetal está representada por especies que predominan en la zona tales como: *Yucca elata* (palmillas), *Dassylirion spp* (izotales), *Dassylirion wheeleri* (sotol), *Fouquieria splendens* (ocotillos), *Agave lechuguilla*, *Larrea tridentata* (gobernadora) y de los géneros *Opuntia*, *Prosopis* (mezquite), *Acacia* (huizache) (Figura53). Los valores espectrales de los índices de vegetación en las imágenes satelitales correspondientes a este punto se muestran en la Tabla 10.

Punto 14. Se ubica en las coordenadas UTM x 564743 y 2820781, a una altitud de 1654 msnm, en la localidad de San Luis Cordero en el municipio de Nazas Durango, la cobertura vegetal se compone principalmente por comunidades de *Agave lechuguilla*, *Agave aspérrima* (maguey cenizo), *Jatropha dioica* (sangre de grado), *Bursera microphylla* (copal), *Lippia graveolens* (orégano mexicano), y una gran variedad de especies del género *Opuntia*, *Cylindropuntia leptocaulis* (tasajillo), *Stenocereus thurberi* (pitaya), *Fouquieria splendens* (ocotillos) (Figura 54). Los valores espectrales de los índices de vegetación en las imágenes satelitales correspondientes a este punto se muestran en la Tabla 10.

Punto 15. Se ubica en las coordenadas UTM x 539766 y 2812204, a una altitud de 1674 msnm, en la localidad de Arroyo Seco en el municipio de San Pedro del Gallo Durango, existiendo condiciones para el desarrollo de la cobertura vegetal con especies predominantes: del género *Opuntia*, *Fouquieria splendens* (ocotillo), *Larrea tridentata* (gobernadora), *Dassylirion*, *Yucca* (izotales), *Yucca elata* (palmillas), *Dassylirion wheeleri* (sotol), *Euphorbia antisyphilitica* (candelilla), *Lippia graveolens* (orégano mexicano), *Cylindropuntia leptocaulis* (tasajillo), *Stenocereus thurberi* (pitaya), *Agave lechuguilla*, *Agave aspérrima* (maguey cenizo) (Figura 55). Los valores espectrales de los índices de vegetación en las imágenes satelitales correspondientes a este punto se muestran en la Tabla 10.

Punto 16. Se ubica en las coordenadas UTM x 542611 y 2787510, a una altitud de 1388 msnm, en el municipio de Rodeo en la localidad de Gatas Mochas las Peñas Durango, encontramos comunidades predominantes de *Fouquieria splendens* (ocotillos), *Prosopis* (mezquite) siendo las de mayor predominancia, seguida por *Larrea tridentata* (gobernadora), *Dassylirion*, *Yucca*

(izotales), *Dassylirion wheeleri* (sotol), *Lippia graveolens* (orégano mexicano), *Euphorbia antisyphilitica* (candelilla), *Jatropha dioica* (sangre de grado), *Peniocereus greggii* (reina de la noche), *Flourensia cernua* (hojasen), *Cylindropuntia leptocaulis* (tasajillo), *Stenocereus thurberi* (pitaya), *Agave lechuguilla*, *Agave aspérrima* (maguey cenizo) (Figura 56). Los valores espectrales de los índices de vegetación en las imágenes satelitales correspondientes a este punto se muestran en la Tabla 10.

Punto 17. Se ubica en las coordenadas UTM x 575546 y 2783425, a los 1293 msnm, en el municipio de Rodeo Durango cerca del río Nazas Durango, la cobertura vegetal de este lugar se encuentra un ecotono, mezclándose diferentes comunidades, se compone aproximadamente en un 80% por bosque de galería primordialmente por coníferas, tal como: *Taxodium mucronatum* (ahuehuete), *Salix babylonica* (sauce llorón). Entre las comunidades xerófilas encontramos *Fouquieria splendens* (ocotillos), *Larrea tridentata* (gobernadora), *Dassylirion Yucca* (izotales), *Dassylirion wheeleri* (sotol), *Euphorbia antisyphilitica* (candelilla), *Lippia graveolens* (orégano mexicano), *Cylindropuntia leptocaulis* (tasajillo), *Stenocereus thurberi* (pitaya) y del género *Prosopis* (mezquite). En este ecotono se corrompe la dinámica de la vegetación debido a la fragmentación del hábitat al existir vías de comunicación tales como las carreteras y zonas agrícolas de pastoreo (Figura 57). Los valores espectrales de los índices de vegetación en las imágenes satelitales correspondientes a este punto se muestran en la Tabla 10.

Punto 18. Se ubica en las coordenadas UTM x 648249 y 2728049, a una altitud de 1890 msnm., en el municipio de Cuencáme Durango, la vegetación predominante en la zona está dominada por *Larrea tridentata* (gobernadora), *Dassylirion* y *Yucca* (izotales); *Dassylirion wheeleri* (sotol), *Euphorbia antisyphilitica* (candelilla), *Jatropha dioica* (sangre de grado), *Cylindropuntia leptocaulis* (tasajillo), *Stenocereus thurberi* (pitaya) y pastizales, este punto queda fuera de nuestra área de estudio la Comarca Lagunera, pero se considera ya que pertenece a la misma dinámica de la región (Figura 58).

A continuación se muestran algunos de los registros fotográficos que describen los puntos de caracterización fisionómica de la Comarca Lagunera México:



Figura 41. Punto 1 de caracterización fisionómica en los límites de Matamoros y Viesca.



Figura 42. Punto 2 de caracterización fisionómica en las dunas de Bilbao, Viesca.



Figura 43. Punto 3 de caracterización fisionómica en la laguna de Mayrán Coahuila.



Figura 44. Punto 4 de caracterización fisionómica Coahuila.



Figura 45. Punto 5 de caracterización fisionómica entre los límites entre las rancherías del Diamante y San Agustín en Ceballos Mapimí Durango.



Figura 46. Punto 6 de caracterización fisionómica entre los límites de la Reserva de la Biosfera de Mapimí.



Figura 47. Punto 7 de caracterización fisionómica, en la localidad de Bermejillo Durango.



Figura 48. Punto 8 de caracterización fisionómica, en la localidad de Mapimí Durango.



Figura 49. Punto 9 de caracterización fisionómica, en la localidad de Ojuela Durango.



Figura 50. Punto 10 de caracterización fisionómica en la localidad del Diamante Durango.



Figura 51. Punto 11 de caracterización fisionómica en el municipio de Tlalhuilio Durango.



Figura 52. Punto 12 de caracterización fisionómica en la localidad de Vicente Suárez Durango.



Figura 53. Punto 13 de caracterización fisionómica San Luis Cordero Durango.



Figura 54. Punto 14 de caracterización fisionómica en el municipio de Nazas Durango.



Figura 55. Punto 15 de caracterización fisionómica en el municipio de San Pedro Gallo Durango.



Figura 56. Punto 16 de caracterización fisionómica en el municipio del Rodeo Durango.



Figura 57. Punto 17 de caracterización fisionómica cerca del río Nazas Durango.



Figura 58. Punto 18 de caracterización fisionómica en el municipio de Cuencáme Durango.

Se desarrolló y elaboró un Sistema de información Geográfica, en el software ArcGis 9.3 como producto final para el manejo de toda la información obtenida (Figura 59).

La geodatabase desarrollada que almacena mapas de vegetación resultante, archivos vectoriales de la región y archivos raster de la zona de estudio, se encuentra en el Laboratorio de Análisis Geoespaciales (LAGE) del Instituto de Geografía de la UNAM, para su posterior consulta o enriquecimiento a la base de datos.

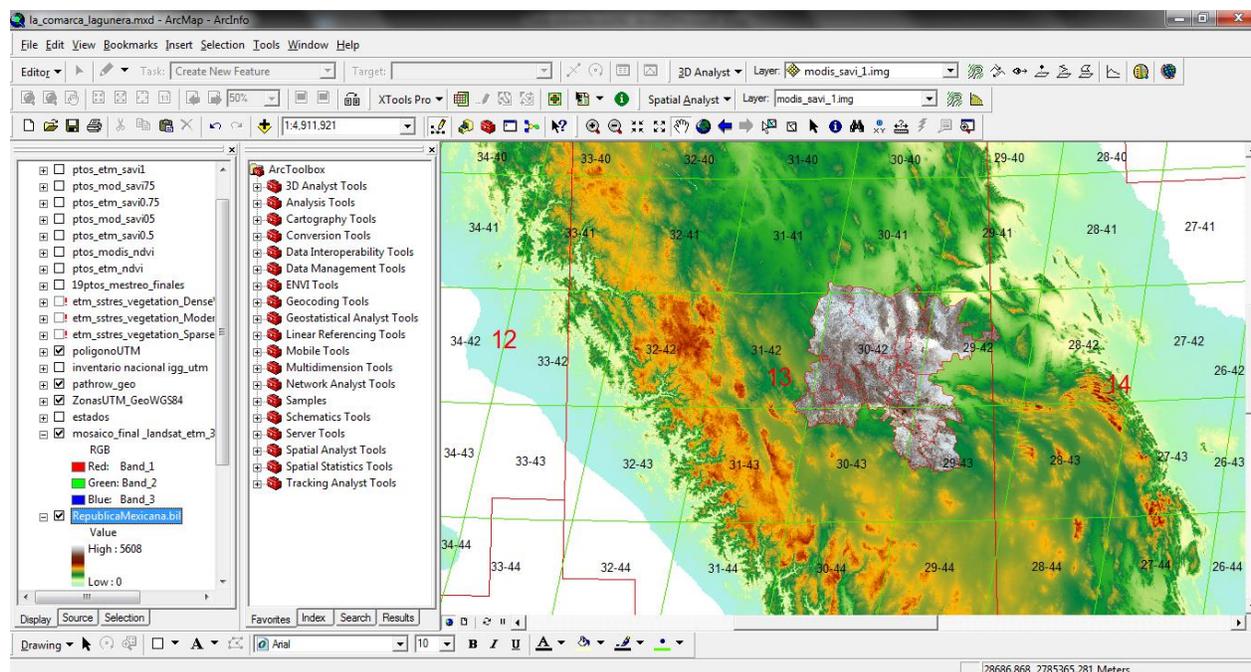


Figura 59. Desarrollo del Sistema de Información Geográfica (SIG), generado en ArcGis 9.3.

A continuación se enlistan los siguientes productos obtenidos del procesamiento de las imágenes satelitales y construcción del Sistema de Información Geográfica.

Archivos vectoriales generados en formato shape (.Shp).

1. Puntos de caracterización.
2. Poligonal de la Comarca Lagunera.
3. Polígonos de los estados de Chihuahua, Durango, Coahuila, Zacatecas.

4. Paht-Row de imágenes LANDSAT 7 ETM +.
5. Polígono de la vegetación detectada

Archivos raster generados en formato (.img)

1. Mosaico de la Comarca Lagunera de las imágenes satelitales LANDSAT 7 ETM +.
2. Índice de vegetación NDVI para LANDSAT 7 ETM +
3. Índice de vegetación NDVI para MODIS-TERRA
4. Índice de vegetación SAVI con factor  $l = 0.5$  para LANDSAT 7 ETM +
5. Índice de vegetación SAVI con factor  $l = 0.75$  para LANDSAT 7 ETM +
6. Índice de vegetación SAVI con factor  $l = 1.0$  para 7 ETM +
7. índice de vegetación SAVI con factor  $l = 0.5$  para MODIS-TERRA
8. índice de vegetación SAVI con factor  $l = 0.75$  para MODIS-TERRA
9. índice de vegetación SAVI con factor  $l = 1.0$  para MODIS-TERRA

Mapas

1. Mapa de localización del área de estudio
2. Mapa de path row de las imágenes satelitales LANDSAT 7 ETM +
3. Mapa del compuesto RGB 321 del sensor LANDSAT 7 ETM +
4. Mapa del compuesto RGB 432 del sensor LANDSAT 7 ETM +
5. Mapa del compuesto RGB 432 del sensor MODIS-TERRA
6. Mapa de la delineación de la vegetación para LANDSAT 7 ETM +
7. Mapa del índice de vegetación NDVI para LANDSAT 7 ETM +
8. Mapa del índice de vegetación NDVI para MODIS-TERRA
9. Mapa del índice de vegetación SAVI con factor  $l = 0.5$  para LANDSAT 7 ETM +
10. Mapa del índice de vegetación SAVI con factor  $l = 0.75$  para LANDSAT 7 ETM +
11. Mapa del índice de vegetación SAVI con factor  $l = 1.0$  para LANDSAT 7 ETM +
12. Mapa del índice de vegetación SAVI con factor  $l = 0.5$  para MODIS-TERRA
13. Mapa del índice de vegetación SAVI con factor  $l = 0.75$  para MODIS-TERRA
14. Mapa del índice de vegetación SAVI con factor  $l = 1.0$  para MODIS-TERRA
15. Mapa de los puntos de caracterización fisionómica

## IX. ANÁLISIS y DISCUSIÓN

La combinación RGB en color verdadero 321 (Figura 19), sólo se pudo realizar en la imagen del sensor LANDSAT 7 ETM +, debido a que cuenta con 6 bandas espectrales (verde, azul, rojo, infrarrojo cercano, infrarrojo medio e infrarrojo lejano), con respecto a la imagen del sensor MODIS-TERRA al no proporcionarse la banda 1 que corresponde al verde del espectro visible, debido a que solo se brindan productos ya procesados y con dos bandas del espectro visible (azul y rojo) en los sitios web, esta combinación se utilizó como referencia para discriminar y clasificar de manera general las diferentes coberturas de vegetación representadas, basándonos en las sombras, tonos, texturas y color que presentó la imagen satelital LANDSAT 7ETM+.

Mediante la combinación RGB falso color 432, en la imagen LANDSAT 7 ETM + (Figura 20), dada su resolución espacial de 30 metros y en la imagen MODIS-TERRA (Figura 21), con una resolución espacial de 250 metros y mayor resolución espectral. En ambos casos se obtiene un análisis visual, analizando las sombras, tonos, texturas y color, logrando describir con mayor facilidad la vegetación de la región. Se observan distintas tonalidades de colores: en rojo intenso aquellas que corresponden a las diferentes zonas de agricultura de riego, en tonalidades rojas claras aquellas zonas con vegetación xerófila perennifolia y con tonalidades rojas tenues se identificaron zonas de vegetación xerófila escasa. Lo único que se logra identificar con mayor certidumbre son comunidades de chaparral. Con base en el inventario nacional forestal (Palacio-Prieto *et al.*, 2000), las demás coberturas correspondientes al matorral micrófilo, matorral rosetófilo, matorral crasicaule, matorral submontano, chaparral, pastizales, mezquites, vegetación gipsófila y halófila son imperceptibles en este tipo análisis, lo que solo se identifica de manera cualitativa no cuantitativamente como al obtener un índice de vegetación, identificando zonas de mayor actividad fotosintética.

La respuesta espectral, se muestra con las curvas típicas que presenta la vegetación, con la absorción de la banda del infrarrojo, se determinó de manera puntual por pixel conforme lo delimita el inventario nacional forestal para cada una de las imágenes satelitales:

En el caso de LANDSAT 7 ETM + (Figura 22), fue clara la discriminación de la vegetación natural y las zonas de agricultura, debido a su buena resolución espacial de 30 metros por pixel. En el perfil espectral se muestra claramente la baja reflectancia que presenta la vegetación en la curva de absorción en la banda del infrarrojo cercano, todos los tipos de vegetación tienen el mismo patrón pero reflejando en diferentes grados, dejando claro que la resolución espectral en LANDSAT 7 ETM + es baja, la cobertura de la agricultura de riego presenta los mayores niveles de reflectancia y los más bajos corresponden al chaparral, este comportamiento que se observa queda identificado directamente a la fenología, orientación, geología, sustrato y estructura de las diferentes coberturas.

En caso de MODIS-TERRA (Figura 23), fue difusa la discriminación de la vegetación natural con respecto a las zonas de agricultura, debido a la baja resolución espacial de 250 metros por pixel. En el perfil espectral se muestra claramente la reflectancia que presenta la vegetación debido a la alta resolución espectral, todos los tipos de vegetación tienen el mismo patrón pero en diferentes grados de absorción, al igual que LANDSAT 7 ETM +, la cobertura de la agricultura de riego presenta los mayores niveles de reflectancia en el infrarrojo y los más bajos corresponden a la cobertura del matorral rosetófilo, este comportamiento que se observa queda identificado directamente a la fenología, orientación, geología, sustrato y estructura de las diferentes coberturas vegetales (Huete, *et al.*, 2011).

La obtención del mapa de la delineación de la vegetación, solo fue posible en la imagen LANDSAT 7 ETM +, debido a que cuenta con 6 bandas espectrales (verde, azul, rojo, infrarrojo cercano, infrarrojo medio e infrarrojo lejano), con respecto al sensor MODIS-TERRA, es un producto MOD13 con un nivel de procesamiento 5 y al no proporcionarse la banda 1 que corresponde al verde del espectro visible, no fue posible realizar el mapa de vegetación.

El rango de valores obtenidos para LANDSAT 7 ETM + (Figura 24), derivado del módulo *Vegetation Delineation and Stress Detection*, que aplica la combinación del algoritmo que se usa

para la obtención del NDVI con las bandas del espectro visible (verde, azul y roja), dando valores que oscila en un rango de 0 a 0.70:

Vegetación densa = 0.51-0.70, representada en color rojo, corresponde a zonas de vegetación natural claramente activa y algunas zonas de riego.

Vegetación moderada = 0.26-0.50, representada en color verde representa claramente toda la zona de agricultura activa.

Vegetación dispersa = 0.01-0.25, representada en color amarillo corresponde a la vegetación natural xerófila y en zona de agricultura representa cultivos con algún grado de estrés.

EL cálculo del índice de vegetación NVDI, se llevó acabo en ambas imágenes satelitales LANDSAT ETM 7 + y MODIS-TERRA, obteniendo:

- La estadística básica indica que el NDVI en LANDSAT 7 ETM +, la imagen tiene valores digitales que van de -0.98 hasta 0.98, con una media negativa de -0.06, indicando poca presencia de vegetación en la escena.
- La estadística básica indica que el NDVI en MODIS-TERRA, la imagen tiene valores digitales que van de -0.19 hasta 0.94, con una media positiva de 0.23 indicando la presencia de vegetación vigorosa en la escena y con una desviación estándar positiva.
- LANDSAT 7 EMT +, lo valores digitales obtenidos mayores a cero indican claramente a las zonas de cultivo con rangos de 0.1 a 0.7 con respecto a la vegetación natural de la región
- MODIS-TERRA, los valores obtenidos en un rango de 0.5 a 1.0 corresponden en su mayoría a zonas de cultivos, y con respecto a las zonas de vegetación natural se logró discriminar parte de ella con valores por debajo de 0.5 a 0.1

Al aplicar el índice NDVI se obtuvo una mayor confiabilidad en la respuesta espectral que proporciona la imagen MODIS-TERRA en comparación a LANDSAT 7 ETM+, aunque su resolución espacial complica la delimitación de las diferentes coberturas de la vegetación natural y solo se obtuvieron productos a pequeña escala por encima de 1:200 000, la cual no resulta muy conveniente para estas zonas.

EL cálculo del índice de vegetación SAVI, se llevó a cabo en las imágenes satelitales LANDSAT 7 ETM + y MODIS-TERRA, aceptando que la hipótesis planteada: El índice de vegetación SAVI generado en las imágenes LANDSAT 7 ETM + y MODIS-TERRA, deben representar con mayor confiabilidad las características de la vegetación xerófila de la Comarca Lagunera, basado en la resolución espectral, en comparación con el índice NDVI generado con las imágenes LANDSAT 7 ETM + y MODIS-TERRA. Se cumple en ciertas condiciones esperada para la vegetación xerófila, aunque en ninguno de nuestros puntos de caracterización se haya cumplido, obteniendo:

- La estadística básica y la comparación puntual indica que el índice SAVI en LANDSAT 7 ETM +, con factor  $l$  de 0.5, 0.75 y 1.0, describe los valores digitales más altos que el índice NDVI, siendo con el factor  $l = 1.$ , el que obtuvo los máximos valores digitales esperados de la vegetación detectada para esa escena.
- Se observa en la (Figura 39), la gráfica que corresponden a los puntos de caracterización fisionómica con una tendencia negativa, debido a que el suelo presenta mayor actividad reflectiva a la vegetación dada su fenología y destacando que el índice de vegetación SAVI con factor  $l = 1$ , presenta mayores valores digitales distribuidos en el cuadrante de los negativos en comparación del NDVI.
- La estadística básica y la comparación puntual indican que el índice SAVI en MODIS-TERRA, muestra un error en los valores digitales, dando resultados inversos y confusos, tal que el índice de vegetación NDVI siempre tiene valores mayores al índice de

vegetación SAVI, se determina que existe un error debido al nivel de procesamiento MOD13 previo con la que cuenta la imagen MODIS-TERRA, ya que trabajando con otra imagen proveniente de la Comisión Nacional para el Conocimiento y uso de la Biodiversidad (CONABIO) el proceso resulta correcto, debido a que podemos obtener todas las bandas espectrales de las imágenes y procesarlas, el único inconveniente para este trabajo es la resolución espacial de 500 metros por pixel, al contar con diferentes resoluciones espaciales por pixel, por lo tanto no podemos valorar los resultados, a lo que (García-Mora y Mas J. F., 2011), concluyen que el uso de imágenes satelitales MODIS permiten generar mapas de uso de suelo y vegetación con un nivel relativamente detallado debido a su alta resolución espectral en comparación a LANDSAT 7 ETM +.

Los puntos de caracterización fisionómica solo fueron descritos ya que se visitaron los sitios con la finalidad de tener la certeza de la vegetación presente en el lugar y se registró en la hoja de campo acompañado de un registro fotográfico y se hizo énfasis en la descripción de los principales géneros de plantas y en su mejor caso se logró identificar las especies con mayor dominancia en la región de la Comarca Lagunera y se enlistan a continuación:

1. *Agave aspérrima*; Jacobi. (maguey cenizo)
2. *Agave lechuguilla*; Torr
3. *Bursera microphylla*; Gray (copal)
4. *Castela texana*; Liebm (chaparro amargo)
5. *Cylindropuntia leptocaulis*; F.m. Knuth (tasajillo)
6. *Dasyllirion wheeleri*; S.Watson Ex Rothr (sotol)
7. *Distichlis spicata*; Greene (zacate salado)
8. *Euphorbia antisiphilitica*; Zuuc (candelilla)
9. *Flourensia cernua*; A.Gray ex Nutt. (hojasen)
10. *Fouquieria splendens*; Engelm (ocotillos)
11. *Jatropha dioica*; Sessé (sangre de grado)
12. *Koeberlinia spinosa*; Engl (corona de Cristo)
13. *Larrea tridentata*; Coville (gobernadora)

14. *Lippia graveolens*; Schauer (orégano mexicano)
15. *Parthenium incanum*; Kunth (Mariola)
16. *Peniocereus greggii*; (Engelm.) Britton & Rose (reina de la noche)
17. *Prosopis glandulosa*; Torr
18. *Prosopis laevigata*; (Humb. & Bonpl. ex Willd.) M.C.Johnst.
19. *Stenocereus thurberi*; (Engelm.) Buxb (pitaya)
20. *Yucca elata*; Engelm (palmillas)
21. Género *Agave*
22. Género *Opuntia*
23. Género *Dasyllirion*; Greene (izotales)
24. Familia *Cactaceae*

Con esta metodología ya no fueron empleados todos los parámetros establecidos en las hojas de caracterización fisionómica y se dejan como puntos de referencia, para que posteriormente se realicen diferentes metodologías para poder determinar: porcentajes de cobertura, biomasa, productividad y así realizar análisis multitemporal para tener monitoreadas las zonas áridas y semiáridas de México a través del tiempo y poder emplear modelos de predicción.

La elaboración del sistema de información geográfica (SIG), se realizó con el fin de poder administrar, manejar y visualizar toda la información requerida y generada, quedando disponible en una geodatabase en el Laboratorio de Análisis Geospaciales del Instituto de Geografía para poder ser consultada, enriquecida y mejorada en cualquier momento por cualquier usuario que así lo disponga.

## X CONCLUSIONES

Las conclusiones a las que se llegan en este trabajo son las siguientes:

- En las zonas áridas y semiáridas de México se requieren de imágenes satelitales que conjuntamente sean de mayor resolución espectral, espacial, radiométrica y temporal, si se quiere cuantificar y obtener porcentajes de coberturas de vegetación xerófila y porcentajes de productividad y de biomasa, realizando un análisis multitemporal a grandes escalas por ejemplo 1:50 000.
- Los compuestos de falso color solo permiten realizar estimaciones cualitativas derivadas del análisis de las sombras, tonos, texturas y color que presentan las imágenes satelitales, y no cuantitativas, por lo que solo se utiliza para una discriminación de coberturas visualmente.
- La curva de reflectancia de la vegetación xerófila tiene un mayor contraste en la banda del infrarrojo cercano, de la imagen satelital MODIS-TERRA que en LANDSAT 7 ETM +, debido a la alta resolución espectral de MODIS.
- La hipótesis planteada: El índice de vegetación SAVI generado en las imágenes LANDSAT 7 ETM + y MODIS-TERRA, deben representar con mayor confiabilidad las características de la vegetación xerófila de la Comarca Lagunera, basado en la resolución espectral, en comparación con el índice NDVI generado con las imágenes LANDSAT 7 ETM + y MODIS-TERRA. Se cumple, en ciertas condiciones para LANDSAT 7 ETM + y no para MODIS-TERRA.
- El índice de vegetación NDVI propuesto por (Rouse *et al.*, 1974), demuestra tener un comportamiento estable, siendo calculados sin errores en ambas imágenes satelitales.
- El índice de vegetación SAVI propuesto por (Huete, 1988), demuestra tener cierta ventaja sobre el NDVI, pero presentó un inestabilidad al momento de implementarlo en las imágenes satelitales MODIS-TERRA, en la imagen LANDSAT 7 ETM+, los resultados

fueron negativos al igual que el NDVI pero fueron interpretados en el cuadrante de los negativos, concluyendo que el índice de vegetación SAVI, puede ser empleado donde el índice de vegetación NDVI resulte ser positivo y utilizando un factor  $l$  de acuerdo al porcentaje de cobertura vegetal existente.

## **XI. RECOMENDACIONES**

- Para el monitoreo de recursos de zonas áridas y semiáridas puede tener mejores resultados empleando imágenes satelitales o fotografías aéreas de mayor resolución tanto espacial como espectral.
- Realizar una biblioteca o base de datos de firmas espectrales de la vegetación de zonas áridas y semiáridas de México.
- Realizar un análisis multitemporal con imágenes de alta resolución espectral y espacial, para decidir con cual se puede monitorear la dinámica de las zonas áridas y semiáridas de México con mayor eficiencia y generar porcentajes de cobertura, productividad, biomasa.
- Realizar muestreos con la finalidad de realizar un listado florístico de los puntos de caracterización fisionómica, para conocer a detalle la diversidad de la zona.
- Implementar dispositivos como radiómetros que ayudarán a realizar una clasificación con mayor certidumbre de la identificación de las cobertura vegetal deseada.
- Realizar una actualización cartográfica a una gran escala de la vegetación en la región de la Comarca Lagunera.

## XI. BIBLIOGRAFÍA CITADA

1. Amadou T. y Eastman J. R. 2006. Vegetation Indices. En. Eastman J. R: IDRISI Andes. Guide to GIS and Image Processing. Clark Labs, Clark University 950, Worcester, M A 01610-1477 USA. pp. 218-230.
2. Bähra, H.P. y H. Lenkb. 2005. Steps to cognition in image analysis and in philosophy a comparison.
3. 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. FAO Documento Técnico de Pesca. No. 295. Roma, FAO. pp. 212.
4. Castillo M. Á. 2005. Los Sistemas de informacion Geografica y los recursos naturales: Percepcion Remota.
5. CCRS. Tutorial: Fundamentals of Remote Sensing. Canada Center for Remote Sensing 2006.
6. Cervantes-Ramírez M. C. y Franco-González A. M. 2008. Diagnóstico inicial del medio físico. En López-López., Á., Sánchez-Crispín Á (eds.). Comarca Lagunera: Procesos regionales en el contexto global. Instituto de Geografía, UNAM.
7. Chuvieco, E. 1996. Fundamentos de Teledetección Espacial. Madrid: ediciones RIALP, S.A. pp. 568.
8. Chuvieco, E. 2002. Teledeteccion ambiental: La observación de la Tierra desde el espacio. Ariel. Madrid. pp. 586.
9. Chuvieco, E. 2008. Fundamentos de Teledetección Espacial. Madrid: ediciones RIALP, S.A. pp.594.
10. Colditz, R., Cruz-Lopez, M.I., Mas, J. F., Ressler, R., López-Saldaña, G., 2011. Herramientas de análisis de los datos MODIS., en Mas J. F. (Coord.), Aplicaciones del sensor MODIS para el monitoreo del territorio. Secretaria del Medio Ambiente y Recursos Naturales.
11. Cotera, M. 1999. Maravilloso Desierto Chihuahuense. PRONATURA. México. pp. 8-13
12. Dimmitt, M. A. 2000. Plant ecology of the Sonoran Desert Region en Phillips, S. J., y P. Wentworth (coords.). A Natural History of the Sonoran Desert, Arizona-Sonora Desert Museum Press, Tucson, Arizona, pp. 3-18
13. Gabriel-Morales J., Pérez-Damián J.L., 2008. Paisajes Geográficos., en López-López, Á., Sánchez-Crispín, Á (eds.). Comarca Lagunera Procesos regionales en el contexto global. Instituto de Geografía, UNAM.
14. García-Arévalo, A. González-Romero, V.M. Reyes Gómez, E. Rivera García, B. Castillo Elías, A. Martínez Chacón, y G.L. Portales Betancourt. 1998. Informe final entregado a CONACYT, del proyecto 1843PN9507 (Febrero 1996-Febrero 1998). Efecto de mamíferos nativos e introducidos sobre la composición y estructura de dos comunidades vegetales en el Desierto Chihuahuense. pp. 33.
15. García-Mora T. J. y Mas J. F. 2011. Presentación del sensor MODIS., en Mas J. F. (Coord.), Aplicaciones del sensor MODIS para el monitoreo del territorio. Secretaria del Medio Ambiente y Recursos Naturales.
16. García-Mora T. J., Mas J. F. 2011. Mondland: Los productos de superficie terrestre MODIS., en Mas J. F. (Coord.), Aplicaciones del sensor MODIS para el monitoreo del territorio. Secretaria del Medio Ambiente y Recursos Naturales.

17. Gibson, J. P. 2000. *Introductory Remote Sensing. Principles and Concepts*. Routledge, New York.
18. Gilabert, M. J. P. H. 1997. Acerca de los Índices de Vegetación. *Revista de Teledetección* Vol. 8.
19. González, E. M., S. González E. y Y. Herrera A. 1991. Listados Florísticos de México, IX. Flora de Durango. Instituto de Biología, Universidad Autónoma de México. pp. 167
20. Granados-Ramírez R. y Gómez-Rodríguez G. 2008. Dinámica atmosférica y climatología. en López-López., Á., Sánchez-Crispín Á (eds.). *Comarca Lagunera Procesos regionales en el contexto global*. Instituto de Geografía, UNAM.
21. Gutman, G. G. 1991. *Vegetation Index From AVHRR: an Update and Prospects*, *Remote Sensing of Environment*. pp. 121-135.
22. Henrickson J., y M. Johnston., 1986. *Vegetation and community types of the Chihuahuan Desert*, en Barlow, J. C., A. M. Powell y B. N. Timmermann coords., *Second Symposium on Resources of the Chihuahua Desert Region*, Chihuahuan Desert Research Institute, Alpine, Texas, pp. 20-39.
23. Henrickson, J., y M. Johnston 2004. *A flora of the Chihuahuan Desert Region*, edición 1.5.
24. Hernández, H. M. 2006. *La vida en los desiertos mexicanos-México*: FCE, SEP, CONACYT, CAB. pp. 188.
25. Hernández-García L. 2008. *Delimitación Geográfica*. en López-López., Á., Sánchez-Crispín Á (eds.). *Comarca Lagunera Procesos regionales en el contexto global*. Instituto de Geografía, UNAM.
26. Herrera, A. Y. 2001. *Las Gramíneas de Durango*, 1ª Edición. Ed. Filo de Agua, Durango, México. pp. 478.
27. Huete, A. R. 1988. *A Soil-Adjusted Vegetation Index SAVI*. *Remote Sensing of Environment* Vol. 25.
28. Huete, A. R. y Warrick, A. W. 1990. *Assessment of vegetation and soil water regimens in partial canopies with optical remotely sensed data*. *Remote Sensing of Environment*. pp. 155-167.
29. Huete, A. R., Solano-Barajas, R., Glenn, Edward P., Restrepo-Coupe, N., 2011. *Monitoreo de propiedades y procesos ecosistémicos con índices de vegetación MODIS.*, en Mas J. F. (Coord.), *Aplicaciones del sensor MODIS para el monitoreo del territorio*. Secretaria del Medio Ambiente y Recursos Naturales.
30. INEGI. 2008. <http://www.inegi.gob.mx/inegi/default.aspx?s=geo&c=909>
31. Jackson, R. D., and A. R. Huete. 1991. *Interpreting vegetation indexes*. *Preventive Vet. Med.* pp. 185-200.
32. Jackson, R., Lechowiz, M. J. y Mooney, x. L. 2001. *Phenology, growth and allocation in global terrestrial productivity*.
33. Janssen, John R. y Mark W. Jackson. 2001 *Introductory digital image processing: Module 1 The remote sensing process*, Vol. 3. Department of Geographihc, University of South Carolina columbia, south Carolina .
34. King, R. B. 2002. *Land cover mapping principles: a return to interpretation fundamentals*. *International Journal of Remote Sensing*. Vol. 23. Núm 18. pp. 3525-3545
35. Lemus, R. O. 1999. *Valores y firmas espectrales en algunos cultivos de importacia economica para estimaciones agronomicas*. En: IX Congreso Nacional de Irrigacion.

- Simposio 1. Ingeniería de Riego. 27-29 de octubre de 1999, Culiacan, Sinaloa, México. pp. 281-288.
36. López-Blanco J. 2005, Sistemas de Información Geográfica en Estudios de Geomorfología Ambiental y Recursos Naturales. Ed. Ocelote México. pp. 187.
37. MacMahon, J. A. 1979. North America, en Goodall, D., y R. Perry coords. Arid-Land Ecosystems: Structure, Functioning and Management, Cambridge University Press, Cambridge, Inglaterra. pp. 21-82.
38. Meliá, J., M. A. Gilabert. 1993. Contribución de la teledetección en el estudio de las regiones semiáridas. En: S. Gandía y J. Meliá. La teledetección en el seguimiento de los fenómenos naturales. Climatología y desertificación. Universidad de Valencia. España. pp. 35-54.
39. Méndez-González J., Santos-Méndez A., García-García M., González-Ontiveros V., Nájera-Luna J. A. Aplicación De Sensores Remotos Para La Evaluación de Áreas de *Prosopis* spp. (1990-2006), En La Región De Mexicali, B.C., México. Rev. Chapingo Z. Áridas. 2007. Vol. 6 Núm1:1-154 Bermejillo, Durango. México. <http://www.chapingo.uruza.edu.mx> pp. 37-45.
40. Mittermeier, C., G. Ceballos, E. Ezcurra, R. Schmidt, H. M. Hernández, B. Goettsch, W. Konstant y P. Robles Gil. 2002. El gran desierto de Chihuahua, en Mittermeier, R., C. Mittermeier, P. Robles Gil, J. Pilgrim, G. Fonseca, T. Brooks y W. Konstant coords. Áreas silvestres: Las últimas regiones vírgenes del mundo, Cemex, México. pp. 335-3349.
41. Palacio-Prieto, J.L., G. Bocco, A. Velazquez, J. Mas, F. Takaki-Takaki, A. Victoria, L. Luna-González, G. Gómez-Rodríguez, J. López García, M. Palma-Muñoz, I. Trejo-Vázquez, A. Peralta-Higuera, J. Prado-Molina, A. Rodríguez-Aguilar, R. Mayorga-Saucedo y F. González-Medrano, 2000., La Condición Actual de los Recursos Forestales en México; Resultado del Inventario Forestal Nacional 2000. Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía. pp. 183-202.
42. Quintero-Pérez, J. A., 2009, Definición y origen de los Sistemas de Información Geográfica”, capítulo IV, Conceptos de la Geomatica en México, Geografía para el siglo XXI, Instituto de Geografía. pp. 115-147.
43. Rabben, E. L., 1960, Fundamentals of photo interpretation. In Manual of Photographic interpretation, edited by R. N. Colwell (Washington: ASPRS). pp. 99-168.
44. Raymon A. y Serway, J. W. 2005. Física para ciencias e ingenierías (Vol. II). California State, USA: International Thomson Editores, S. A. de C. V.
45. Rodríguez-Chávez O.E., Arredondo-Bautista H.A. 2005. Manual Para El Manejo Y Procesamiento De Imágenes Satelitales Obtenidas Del Sensor Remoto Modis De La Nasa, Aplicado En Estudios De Ingeniería Civil. Trabajo de Grado. Pontificia Universidad Javeriana, Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Civil. Bogotá D. C.
46. Rouse, J. W., Haas, R. H., Schell, J. A., Deering, D. W. y Harlan, J. C. 1974. Monitoring the vernal advancement of retrogradation of natural vegetation. NASA/OSFC. Type III. Final Report. Oreenbello MD. pp. 371
47. Rzedowski, J. 1968. Las principales zonas áridas de México y su vegetación. *Bios*. Vol. 1. pp. 4-24.
48. Rzedowski, J. 1978. Vegetación de México. 1a.reimpresión ed. México: Limusa.

49. Sánchez-Crispín Á. 2008. Delimitación Geográfica. en López-López., Á., Sánchez- Crispín Á (eds.). Comarca Lagunera Procesos regionales en el contexto global. Instituto de Geografía, UNAM.
50. Sánchez-Rodríguez E., Torres-Crespo M.Á., Fernández-Palacios A., Aguilar-Alba-Carmona M., Pino-Serrat I. y Granado-Ruiz L. 2000. Comparación del NDVI con el PVI y el SAVI como Indicadores para la Asignación de Modelos de Combustible para la Estimación del Riesgo de Incendios en Andalucía. *Tecnologías Geográficas para el Desarrollo Sostenible* Departamento de Geografía. Universidad de Alcalá. España. pp. 164-174.
51. Sebem E., González-Rivera C., García-Rodríguez R., De La Vega Panizo R., Angel-Valverde G., 2005. Aportación Del NDVI y Los Sistemas Expertos En La Mejora De La Clasificación Temática De Imágenes Multiespectrales. *Anais XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, Goiânia, Brasil, 16-21 abril, INPE. pp. 2763-2771.
52. Shupe, S. M. y S. E. Marsh. 2004. Cover-and density based vegetation classifications of the Sonora Desert using Landsat TM and ERS-1 SAR imagery. *Remote Sensing of Environmental*. pp. 131-149.
53. Soria-Ruiz J., Granados-Ramírez R. 2005. Relación Entre Los Índices De Vegetación Obtenidos De Los Sensores AVHRR Del Satélite NOAA Y TM Del Landsat. *Ciencia Ergo Sum*, julio-octubre, año/vol. 12, número 002. Universidad Autónoma del Estado de México. Toluca, México. pp.167-174.
54. UNESCO 1997. Map of the world distribution of arid region, MAB Technical Notes 7, París, Francia.
55. Verstappen, H. Th., 1977, *Remote sensing in geomorphology*, (Amsterdam: Elsevier).
56. Villarreal-Quintanilla, J. A. y J. A. Encina-Domínguez. 2005. Plantas vasculares endémicas de Coahuila y algunas áreas adyacentes, México. *Acta Bot. Mex.* pp. 1-46.
57. Volante, J. N., Bianchi, A. R., 2003 Índice de Vegetación Normalizado Diferencial (NDVI) de las Yungas y del Chaco Semiárido en el Noroeste Argentino. EEA Salta. INTA. pp. 24.
58. Warren, B. C. y S. N. Goward 2004. Landsat's Role in Ecological Applications of Remote Sensing. pp. 54-6:535-545

### Páginas Web

- <<http://gaia.inegi.org.mx/mdm5/viewer.html>>
- <<http://glovis.usgs.gov/>>
- <<http://landsat.gsfc.nasa.gov>>
- <<http://modis.gsfc.nasa.gov>>
- <<http://www.astrored.org>>
- <<http://www.inegi.org.mx/est/contenidos/proyectos/ccpv/cpv2010/Default.aspx>>
- <<http://www.jspacesystems.or.jp/ersdac/GDEM/E/1.html>>
- <[http://www.semarnat.gob.mx/informacionambiental/Documents/pdf/cap\\_3\\_suelos.pdf](http://www.semarnat.gob.mx/informacionambiental/Documents/pdf/cap_3_suelos.pdf)>
- <<http://www.tecnomar.com.ve/sig.php>>

## ANEXO I

Estructura de los metadatos de las imágenes del sensor LANDSAT 7 ETM +.

Tabla 11. Metadatos de la imagen ETM3141BZ13.

PROREP Georeference Segment Report V6.3 EASI/PACE 16:12 07Jul2000					
<b>etm3141bz13reg.pix</b> [S 6BIC 7886P 7045L] 22May2000					
1:GEOref Type:150 [Georeferencing] Last Update: 16:59 22May2000					
Contents: Master Georeferencing Segment for File					
Georeference Units : UTM 13 R D121					
Projection : Universal Transverse Mercator					
Datum - Ellipsoid : North American 1927 (Mexico) Clarke 1866					
Upper Left Corner :407277.312 E 3139032.250 N					
Upper Right Corner :643857.312 E 3139032.250 N					
Image Centre :525567.312 E 3033357.250 N					
Lower Left Corner :407277.312 E 2927682.250 N					
Lower Right Corner :643857.312 E 2927682.250 N					
Pixel Size :30.000 E 30.000 N					
Upper Left Corner :105d56'46.71" W Lon 28d22'33.17" N Lat					
Upper Right Corner :103d31'54.98" W Lon 28d22'16.53" N Lat					
Image Centre :104d44'28.79" W Lon 27d25'29.69" N Lat					
Lower Left Corner :105d55'48.66" W Lon 26d28'04.74" N Lat					
Lower Right Corner :103d33'25.02" W Lon 26d27'49.39" N Lat					

Tabla 12. Metadatos de la imagen ETM3142BZ13.

PROREP Georeference Segment Report V6.3 EASI/PACE 22:32 15Jun2000					
<b>etm3142bz13reg.pix</b> [S 6BIC 7898P 7066L] 17May2000					
1:GEOref Type:150 [Georeferencing] Last Update: 16:59 17May2000					
Contents: Master Georeferencing Segment for File					
Georeference Units : UTM 13 R D121					
Projection : Universal Transverse Mercator					
Datum - Ellipsoid : North American 1927 (Mexico) - Clarke 1866					
Upper Left Corner :371585.677 E 2980132.307 N					
Upper Right Corner :608525.677 E 2980132.307 N					
Image Centre :490055.677 E 2874142.307 N					
Lower Left Corner : 371585.677 E 2768152.307 N					
Lower Right Corner : 608525.677 E 2768152.307 N					
Pixel Size : 30.000 E 30.000 N					
Upper Left Corner :106d17'36.64" W Lon 26d56'19.21" N Lat					
Upper Right Corner :103d54'24.46" W Lon 26d56'25.31" N Lat					
Image Centre :105d05'57.67" W Lon 25d59'15.05" N Lat					
Lower Left Corner :106d16'21.84" W Lon 25d01'29.70" N Lat					
Lower Right Corner :103d55'27.68" W Lon 25d01'35.31" N Lat					

Tabla 13. Metadatos de la imagen ETM3143BZ13.

PROREP Georeference Segment Report	V6.3 EASI/PACE	19:33	04Jul2000
<b>etm3143bz13reg.pix</b> [S	6BIC	7894P	7065L]
1:GEOref	Type:150 [Georeferencing]	Last Update:	16:59 19May2000
Contents: Master Georeferencing Segment for File			
Georeference Units	:	UTM	13 Q D121
Projection	:	Universal Transverse Mercator	
Datum - Ellipsoid	:	North American 1927 (Mexico) - Clarke 1866	
Upper Left Corner	:	335753.365 E	2820897.138 N
Upper Right Corner	:	572573.365 E	2820897.138 N
Image Centre	:	454163.365 E	2714922.138 N
Lower Left Corner	:	335753.365 E	2608947.138 N
Lower Right Corner	:	572573.365 E	2608947.138 N
Pixel Size	:	30.000 E	30.000 N
Upper Left Corner	:	106d38'02.88" W	Lon 25d29'51.39" N Lat
Upper Right Corner	:	104d16'40.28" W	Lon 25d30'17.77" N Lat
Image Centre	:	105d27'09.31" W	Lon 24d32'56.14" N Lat
Lower Left Corner	:	106d36'34.31" W	Lon 23d35'02.53" N Lat
Lower Right Corner	:	104d17'19.43" W	Lon 23d35'26.69" N Lat

Tabla 14. Metadatos de la imagen ETM3041BZ13.

PROREP Georeference Segment Report	V6.3 EASI/PACE	22:32	15Jun2000
<b>etm3041bz13reg.pix</b>	[S	6BIC	7835P
1:GEOref	Type:150 [Georeferencing]	Last Update:	17:01 19May2000
Contents: Master Georeferencing Segment for File			
Georeference Units	:	UTM	13 R D121
Projection	:	Universal Transverse Mercator	
Datum - Ellipsoid	:	North American 1927 (Mexico) - Clarke 1866	
Upper Left Corner	:	560024.462 E	3140362.144 N
Upper Right Corner	:	795074.462 E	3140362.144 N
Image Centre	:	677549.462 E	3035362.144 N
Lower Left Corner	:	560024.462 E	2930362.144 N
Lower Right Corner	:	795074.462 E	2930362.144 N
Pixel Size	:	30.000 E	30.000 N
Upper Left Corner	:	104d23'14.33" W	Lon 28d23'23.25" N Lat
Upper Right Corner	:	101d59'23.02" W	Lon 28d21'28.49" N Lat
Image Centre	:	103d12'13.52" W	Lon 27d25'54.04" N Lat
Lower Left Corner	:	104d23'51.71" W	Lon 26d29'38.18" N Lat
Lower Right Corner	:	102d02'26.37" W	Lon 26d27'52.30" N Lat

Tabla 15. Metadatos de la imagen ETM3042BZ13.

PROREP	Georeference Segment Report	V6.3	EASI/PACE	22:32	15Jun2000
<b>etm3042bz13reg.pix</b>	[S	6BIC	7841P	6997L]	22May2000
1:GEOref	Type:150 [Georeferencing]	Last Update:	21:33	22May2000	
Contents: Master Georeferencing Segment for File					
Georeference Units	:	UTM	13 R D121		
Projection	:	Universal Transverse Mercator			
Datum - Ellipsoid	:	North American 1927 (Mexico) - Clarke 1866			
Upper Left Corner	:	526215.056 E		2980702.520 N	
Upper Right Corner	:	761445.056 E		2980702.520 N	
Image Centre	:	643830.056 E		2875747.520 N	
Lower Left Corner	:	526215.056 E		2770792.520 N	
Lower Right Corner	:	761445.056 E		2770792.520 N	
Pixel Size	:	30.000 E		30.000 N	
Upper Left Corner	:	104d44'09.24" W	Lon	26d56'58.21" N	Lat
Upper Right Corner	:	102d22'01.95" W	Lon	26d55'30.64" N	Lat
Image Centre	:	103d33'46.79" W	Lon	25d59'41.65" N	Lat
Lower Left Corner	:	104d44'24.38" W	Lon	25d03'14.35" N	Lat
Lower Right Corner	:	102d24'32.66" W	Lon	25d01'53.81" N	Lat

Tabla 16. Metadatos de la imagen ETM3043BZ13.

PROREP	Georeference Segment Report	V6.3	EASI/PACE	19:33	04Jul2000
<b>etm3043bz13reg.pix</b>	[S	6BIC	7841P	7002L]	23May2000
1:GEOref	Type:150 [Georeferencing]	Last Update:	22:25	23May2000	
Contents: Master Georeferencing Segment for File					
Georeference Units	:	UTM	13 R D121		
Projection	:	Universal Transverse Mercator			
Datum - Ellipsoid	:	North American 1927 (Mexico) - Clarke 1866			
Upper Left Corner	:	491373.577 E		2821032.076 N	
Upper Right Corner	:	726603.577 E		2821032.076 N	
Image Centre	:	608988.577 E		2716002.076 N	
Lower Left Corner	:	491373.577 E		2610972.076 N	
Lower Right Corner	:	726603.577 E		2610972.076 N	
Pixel Size	:	30.000 E		30.000 N	
Upper Left Corner	:	105d05'09.03" W	Lon	25d30'28.47" N	Lat
Upper Right Corner	:	102d44'44.76" W	Lon	25d29'26.17" N	Lat
Image Centre	:	103d55'25.82" W	Lon	24d33'19.86" N	Lat
Lower Left Corner	:	105d05'04.41" W	Lon	23d36'38.32" N	Lat
Lower Right Corner	:	102d46'45.85" W	Lon	23d35'41.22" N	Lat

Tabla 17. Metadatos de la imagen ETM2942BZ13.

PROREP	Georeference Segment Report	V6.3	EASI/PACE	22:38	06Jul2000
<b>etm2942bz13reg.pix</b>	[S 6BIC 7786P 6950L]			31May2000	
1:GEOref	Type:150 [Georeferencing]			Last Update: 14:08	31May2000
Contents: Master Georeferencing Segment for File					
Georeference Units	:	UTM	13 R D121		
Projection	:	Universal Transverse Mercator			
Datum - Ellipsoid	:	North American 1927 (Mexico) - Clarke 1866			
Upper Left Corner	:	683373.243 E		2982451.332 N	
Upper Right Corner	:	916953.243 E		2982451.332 N	
Image Centre	:	800163.243 E		2878201.332 N	
Lower Left Corner	:	683373.243 E		2773951.332 N	
Lower Right Corner	:	916953.243 E		2773951.332 N	
Pixel Size	:	30.000 E		30.000 N	
Upper Left Corner	:	103d09'09.89" W	Lon	26d57'12.38" N	Lat
Upper Right Corner	:	100d48'12.20" W	Lon	26d54'11.09" N	Lat
Image Centre	:	102d00'06.39" W	Lon	25d59'35.17" N	Lat
Lower Left Corner	:	103d10'55.10" W	Lon	25d04'17.78" N	Lat
Lower Right Corner	:	100d52'10.55" W	Lon	25d01'30.93" N	Lat

Tabla 18. Metadatos de la imagen ETM2943BZ13.

PROREP	Georeference Segment Report	V6.3	EASI/PACE	19:33	04Jul2000
<b>etm2943bz13reg.pix</b>	[S 6BIC 7792P 8364L]			24May2000	
1:GEOref	Type:150 [Georeferencing]			Last Update: 23:51	24May2000
Contents: Master Georeferencing Segment for File					
Georeference Units	:	UTM	13 R D121		
Projection	:	Universal Transverse Mercator			
Datum - Ellipsoid	:	North American 1927 (Mexico) - Clarke 1866			
Upper Left Corner	:	649179.828 E		2822120.029 N	
Upper Right Corner	:	882939.828 E		2822120.029 N	
Image Centre	:	766059.828 E		2696660.029 N	
Lower Left Corner	:	649179.828 E		2571200.029 N	
Lower Right Corner	:	882939.828 E		2571200.029 N	
Pixel Size	:	30.000 E		30.000 N	
Upper Left Corner	:	103d30'56.13" W	Lon	25d30'36.87" N	Lat
Upper Right Corner	:	101d11'32.66" W	Lon	25d28'05.87" N	Lat
Image Centre	:	102d22'38.73" W	Lon	24d21'43.07" N	Lat
Lower Left Corner	:	103d32'30.54" W	Lon	23d14'40.64" N	Lat
Lower Right Corner	:	101d15'34.23" W	Lon	23d12'24.67" N	Lat

**ANEXO I**

Tabla 19. Formato de caracterización fisionómica.

Folio: \_\_\_\_\_

Fecha: ____/____/____				
Estado: _____ Municipio: _____				
Localidad: _____ Georreferencia GPS: _____				
Coordenadas UTM N: _____ E: _____ Altitud: _____ msnm.				
Geoforma:	Cañón	Valle Somero	Escorrentías	Planicie
	Ladera	Meseta	Cerro	Cresta
Micro relieve	Accidentado	Ondulado	Irregular	Otro
Pendiente	Porcentaje	Grados	Exposición	
Actividad Antropogenica				
Asentamientos	Cultivo	Aprovechamiento sustentable	Tasa de Pastoreo	
			Nulo- Poco	
			Moderada	
			Alta	
			Severa	
Descripción del Suelo				
Vegetación	%	Condiciones hídricas	Erosión	
Rocas	%	Seco	Hídrica	
Gravas	%	Húmedo	Eólica	
Material Fino	%	Muy Húmedo	Gravedad	
Composición Fisionómica De La Cobertura Vegetal				
		Número de fotografía:		
Estratos	Cobertura %	Matorral	Especies vegetales dominantes por estrato	
Herbáceo		Xerófilo		
Arbustivo		Rosetófilo		
Arbóreo		Crasicaule		
		Micrófilo		