

**Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas
Instituto de Ciencias Básicas y Aplicadas
Centro de Investigación en Gestión de Riesgos y
Cambio Climático**

Tesis

“Teledetección aplicada a la determinación de islas de calor para los años 2000 y 2016: caso Zona Protectora Forestal Vedada, los Terrenos Forestales de Villa Allende”

**Que para obtener el título de Licenciada en Ciencias de la
Tierra**

Presenta

Yessica Cortés Pérez

Director:

Ing. Mauricio José Ríos

Asesora:

M. en C. Andrea Venegas Sandoval

Tuxtla Gutiérrez, Chiapas. Mayo de 2017



AGRADECIMIENTOS

Por la conclusión de esta tesis deseo expresar en primer lugar un profundo agradecimiento a mis padres José Valente Cortés Ortiz y Guadalupe Pérez Carrasco quienes a base de grandes esfuerzos han logrado que yo salga adelante y de quienes he recibido todo el apoyo incondicional.

A mis hermanas Mayumi y Saira, por su paciencia y buen humor para soportarme y ayudarme en aquellos días donde las tareas y trabajos sobrepasaban mis límites emocionales.

También agradezco a los profesores que me orientaron durante mi formación académica principalmente al Biólogo Rogelio Emilio Rivera Ozuna, quién siempre estuvo al pendiente durante mi formación y mi trabajo de tesis.

Por supuesto parte primordial en este trabajo, mi director de tesis, el Ingeniero Mauricio José Ríos quien gracias a su apoyo y dirección pude iniciar y terminar con la elaboración de este gran proyecto, quién me dedicó gran parte de su tiempo y conocimientos los cuales permitieron que el día de hoy haya culminado con mi grado de licenciatura.

Mi asesora la Maestra Andrea Venegas Sandoval quien no solo fue parte importante durante mi formación académica sino también una gran amiga y persona.

Así mismo le agradezco al Doctor Williams Vázquez Morales por haber aceptado ser parte de mis revisores y por compartirme sus conocimientos.

No podían faltar mis encantadores amigos Daniela Torres Cadena, Carlos del Ángel Estrada Marcos y Suhaila Elizabeth Díaz Valencia quienes siempre estuvieron presentes durante la carrera apoyándome y viviendo conmigo grandes alegrías y experiencias compartidas.

Además le agradezco al COCYTECH por el apoyo otorgado para facilitar los trámites de conclusión de esta tesis.

Y sobre todo le agradezco a Dios por darnos salud y fortalezas a mi familia y a mí para seguir adelante y permitirnos llegar hasta el día de hoy...

ÍNDICE

I. INTRODUCCIÓN	2
I.1 MARCO TEÓRICO	3
I.1.1 Percepción remota.....	3
I.1.2 Sistema de Información Geográfica (SIG)	13
I.1.3 Islas de Calor (IC).....	17
I.1.4 Cambio de Uso de Suelo.....	20
I.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	24
I.3 ANTECEDENTES	27
I.4 JUSTIFICACIÓN	35
I.5 HIPÓTESIS	36
I.6 OBJETIVOS	36
I.6.1 Objetivo general.....	36
I.6.2 Objetivos específicos	36
II. MÉTODOS Y ÁREA DE ESTUDIO	37
II.1 ÁREA DE ESTUDIO	37
II.1.1 Descripción del componente natural	39
II.1.2 Descripción del componente social	44
II.2 METODOLOGÍA	46
III. RESULTADOS	59
IV. DISCUSIÓN DE RESULTADOS	98

V. CONCLUSIONES.....	119
VI. RECOMENDACIONES	122
VII. BIBLIOGRAFÍA	125
VIII. ANEXOS	131
VIII.1 UBICACIÓN DE LOS PUNTOS DE REFERENCIA FOTOGRÁFICA.....	131
VIII.2 REGISTRO FOTOGRÁFICO	133
VIII.3 MANUAL DEL PROCEDIMIENTO METODOLÓGICO	148

ÍNDICE DE MAPAS

Mapa 1. Polígono general del ANP Villa Allende	38
Mapa 2. Unidades climáticas del ANP Villa Allende	40
Mapa 3. Rasgos geológicos del ANP Villa Allende.....	41
Mapa 4. Edafología del ANP Villa Allende	42
Mapa 5. Litología del ANP Villa Allende	43
Mapa 6. Uso de Suelo y Vegetación del ANP Villa Allende	44
Mapa 7. Radiancia de la banda 3 de Landsat 7	63
Mapa 8. Radiancia de la banda 4 de Landsat 7	65
Mapa 9. Radiancia de la banda 6 de Landsat 7	66
Mapa 10. Reflectancia de la banda 3 de Landsat 7	67
Mapa 11. Reflectancia de la banda 4 de Landsat 7	68
Mapa 12. NDVI de marzo del año 2000.....	70
Mapa 13. Emisividad de Landsat 7 dentro del ANP	73
Mapa 14. Temperatura brillo de Landsat 7.....	74

Mapa 15. Temperatura Superficial en marzo del año 2000.....	76
Mapa 16. Islas de calor de marzo del año 2000.....	79
Mapa 17. Radiancia de la banda 4 de Landsat 8	81
Mapa 18. Radiancia de la banda 5 de Landsat 8	82
Mapa 19. Radiancia de la banda 10 de Landsat 8	83
Mapa 20. Reflectancia de la banda 4 de Landsat 8	84
Mapa 21. Reflectancia de la banda 5 de Landsat 8	85
Mapa 22. NDVI de marzo del año 2016.....	87
Mapa 23. Emisividad de la imagen Landsat 8 dentro del ANP.....	89
Mapa 24. Temperatura brillo de Landsat 8.....	90
Mapa 25. Temperatura Superficial en marzo del año 2016.....	92
Mapa 26. Islas de calor identificadas en marzo del año 2016	95
Mapa 27. Islas de calor identificadas en marzo de los años 2000 y 2016	96

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Propiedades y aplicaciones de las bandas de Landsat 7	12
Tabla 2. Coordenadas de los vértices del ANP Villa Allende.....	37
Tabla 3. Fuentes de consulta sobre los componentes naturales del ANP Villa Allende	39
Tabla 4. Temperatura promedio histórica por cada una de las estaciones del año.....	41
Tabla 5. Localidades con mayor número de habitantes.....	45
Tabla 6. Resultados del NDVI de marzo del año 2000	71
Tabla 7. Rangos del NDVI del mes de marzo del año 2000	98
Tabla 8. Rangos del NDVI del mes de marzo del año 2016	100

Tabla 9. Rangos de temperatura superficial de marzo del año 2000.....	105
Tabla 10. Relación del NDVI con la TS en el año 2000	105
Tabla 11. Relación entre la TS y la altitud promedio en el año 2000	107
Tabla 12. Rangos de temperatura superficial de marzo del año 2016.....	109
Tabla 13. Relación entre la TS y la altitud promedio en el año 2016	109
Tabla 14. Relación del NDVI con la TS en el año 2016	111

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Componentes de la percepción remota	4
Figura 2. Espectro electromagnético a ambos lados de la región visible	6
Figura 3. Evolución del programa Landsat	11
Figura 4. Componentes de los Sistemas de Información Geográfica (SIG).....	16
Figura 5. Mapa conceptual metodológico	48
Figura 6. Corrección topográfica de la banda 3 de Landsat 7	60
Figura 7. Corrección topográfica de la banda 4 de Landsat 7	60
Figura 8. Corrección topográfica de la banda 6 de Landsat 7	61
Figura 9. Compilado de bandas Landsat7	62
Figura 10. Contraste de la imagen de satélite con la del NDVI de una porción del ANP....	99
Figura 11. Gráfico de los rangos del NDVI en marzo del año 2000.....	103
Figura 12. Gráfico de los rangos del NDVI en marzo del año 2016.....	103
Figura 13. Gráfico de rangos de TS en marzo del año 2000	111
Figura 14. Gráfico de rangos de TS en marzo del año 2016	112
Figura 15. Temperatura ambiental registrada en marzo de los años 2000 y 2016	112

RESUMEN

El presente trabajo abordó la relación que existe entre la condición o estado de la cubierta vegetal y las temperaturas superficiales más elevadas, mismas que se interpretaron como islas de calor, mediante el cálculo del Índice Normalizado Diferencial de la Vegetación (NDVI, por sus siglas en inglés). Este estudio se llevó a cabo a través de la aplicación de técnicas de teledetección con el uso de imágenes Landsat 7 y 8 donde se incluye el Área Natural Protegida Villa Allende, con el objetivo de identificar las islas de calor como consecuencia del cambio de uso del suelo en el área de estudio para los años 2000 y 2016. El proceso metodológico consistió en calcular el Índice Normalizado Diferencial de la Vegetación así como las temperaturas superficiales y de esta manera obtener las islas de calor. De acuerdo con los resultados obtenidos, el Índice Normalizado Diferencial de la Vegetación presentó rangos similares pero con diferente distribución espacial en ambos años. En cuanto a las islas de calor, éstas se presentaron en áreas desprovistas de vegetación asociadas a centros urbanos principalmente, lo cual coincide con las temperaturas superficiales más elevadas. En el año 2000 se observó que las temperaturas superficiales registraron rangos más altos en comparación con las correspondientes al año 2016, así mismo, las islas de calor fueron más extensas en el primer año de estudio que las obtenidas en el año 2016. Los resultados pueden explicarse de acuerdo con las condiciones atmosféricas prevalecientes durante cada año de estudio. En el año 2000 la condición fue muy seca y calurosa debido al intenso fenómeno de El Niño que se presentó desde el año 1997; tales condiciones fueron totalmente distintas para el año 2016, es decir, dentro de los parámetros climáticos promedio.

I. INTRODUCCIÓN

Se considera que el cambio de uso de suelo representa el principal factor que contribuye al aumento de la temperatura tanto ambiental como superficial provocando, entre otros aspectos, la aparición del fenómeno conocido como isla de calor (Kolb, 2013). La isla de calor se refiere a la diferencia térmica entre una superficie de origen antrópico y una superficie natural debido al reemplazo de la vegetación original por otro tipo de superficies diferentes a ésta (por ejemplo concreto, pavimentos, desarrollo de construcciones, o bien, el suelo desnudo), como resultado de alguna actividad humana, provocando el aumento de la temperatura en áreas específicas (Córdova, 2011).

El presente estudio tiene la finalidad de estimar la diferencia de temperatura que existe entre los años 2000 y 2016 en la Zona Protectora Forestal Vedada (ZPFV), los Terrenos Forestales de Villa Allende, a través del cálculo de la temperatura superficial para cada uno de estos años mediante el uso e interpretación de imágenes Landsat 7 y 8.

Para este caso la medición de la temperatura superficial para ambos años se realizó mediante el método directo, ya que la estimación se llevó a cabo mediante el uso de imágenes de satélite. El estudio consiste en el cálculo del índice de vegetación como parámetro indicador que cuantifica e identifica los sectores de la superficie terrestre que presentan mayores cambios, así mismo, ayudan a diferenciar las superficies con presencia de vegetación y áreas deforestadas con el objetivo de determinar el nivel de estrés hídrico (Córdova, 2013). El Índice Normalizado Diferencial de la Vegetación (NDVI) es un parámetro que se calcula a partir de los valores de reflectancia obtenidos del metadato que contiene la imagen (los valores dependen del sensor que tomó la imagen, para este caso ETM+) y que depende de dos partes del espectro electromagnético, 1) longitud de onda roja

y 2) la longitud cercana al infrarrojo (Soto *et al.*, 2012), cálculo que permite clasificar zonas según el crecimiento (estado sucesional), vigor y tipo de vegetación.

Como resultado de este procesamiento de información se logró la caracterización espacial de la variación de la temperatura superficial en la zona de estudio. En este sentido, se puede argumentar, por un lado, que las islas de calor presentadas en el año 2000 se intensificaron debido a las condiciones atmosféricas registradas en ese año y, por otro lado, en el año 2016 las condiciones atmosféricas de la temporada se presentaron dentro de los rangos normales, es decir, que los patrones tanto de precipitación como de temperaturas se presentaron dentro del promedio histórico registrado en la zona de estudio (CONAGUA, 2016) de tal forma que las islas de calor dependieron directamente de la presencia de los centros de población e infraestructura asociada a éstos.

I.1 MARCO TEÓRICO

I.1.1 Percepción remota

Percepción remota o teledetección es la ciencia (técnica y arte) que permite obtener información sin estar en contacto directo y/o físico con el objeto (Fallas, 2003), la cual está constituida por los siguientes componentes:

- Fuente de energía. Provee energía electromagnética.
- Atmósfera. Es el medio que permite la interacción de la energía (emitida o reflejada) con el objeto.
- Objeto. Elemento de estudio que refleja o emite la energía de acuerdo con sus propiedades.
- Sensor remoto. Dispositivo que captura y almacena la radiación electromagnética.

- Transmisión, recepción y procesamiento. Recepción de la información mediante estaciones receptoras, donde se procesa los datos y se convierten a imágenes.
- Interpretación y análisis. Extracción de la información.
- Usuario final. Aplicación de la información extraída.

Mediante la siguiente figura (1) se muestra la relación que guardan los diferentes componentes de la percepción remota:

Componentes de la percepción remota

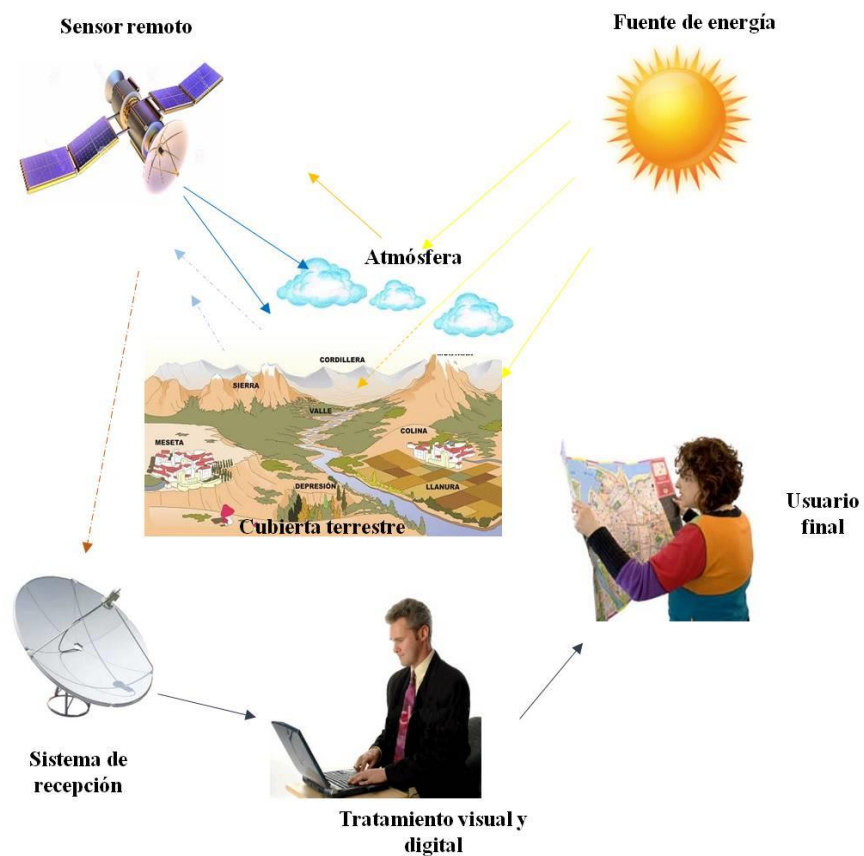


Figura 1. Componentes de la percepción remota
Fuente: modificada de Chuvieco, 1995

La teledetección como técnica se lleva a cabo a través de sensores que perciben la radiación electromagnética, es decir, los sensores captan la emisión y reflexión de la energía que interactúa con el objeto en el espacio (Chuvieco, 1995). Entre los sensores más utilizados se encuentran las cámaras fotográficas, cámaras de video y satélites especializados. El objetivo de éstos últimos es obtener información del objeto a través de la radiación electromagnética que es emitida o reflejada por la superficie terrestre. Los sensores se dividen en dos tipos: activos y pasivos. Los activos son aquellos sensores que emiten su propia energía, puesto que no necesita de otra fuente, mientras que los pasivos se caracterizan por depender de una fuente externa (energía solar) para medir la energía emitida o reflejada por la superficie terrestre (Rosete *et al.*, 2003).

A través del estudio de patrones de respuesta espectral que se obtienen mediante los sensores, nos permite entender el comportamiento del espectro electromagnético de acuerdo con los distintos tipos de superficies (Fontal *et al.*, 2005).

El espectro electromagnético (EE) se refiere a la energía que se desplaza por el espacio y que interactúa con los objetos. Las ondas sinusoidales que se desplazan a través del campo eléctrico (E) y campo magnético (M) representan la radiación emitida por la fuente (energía solar) y viajan hacia el infinito a la velocidad de la luz ($\approx 3 \times 10^8 \text{ ms}^{-1}$) (Hernández *et al.*, 2009).

La longitud de onda se distingue entre distintos tipos de energía electromagnética, abarcando desde longitudes de onda muy pequeña (Rayos gamma, rayos X y ultravioleta) hasta ondas largas (microondas y comunicaciones) (ver figura 2).

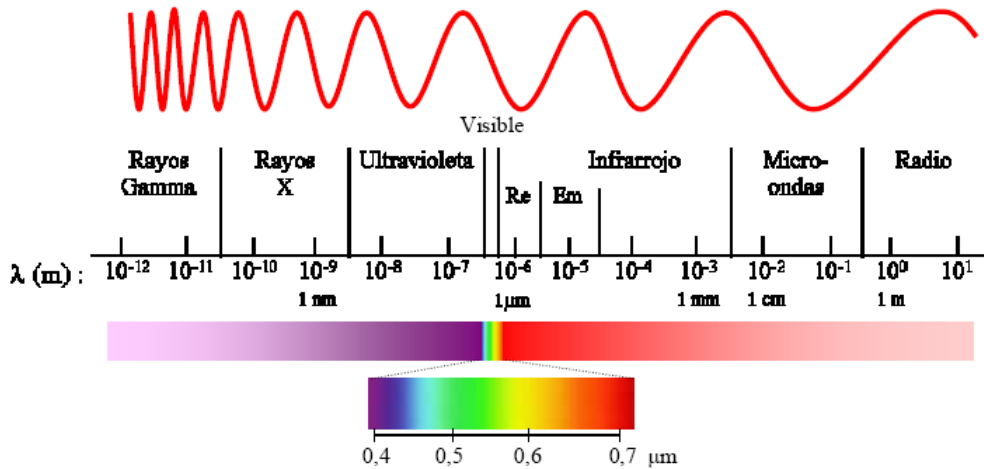


Figura 2. Espectro electromagnético a ambos lados de la región visible
Fuente: Henández *et al.*, 2009

Una vez que la energía electromagnética llega a la superficie terrestre, cada material interactúa de diferente manera de acuerdo con el patrón de respuesta espectral.

Considerando lo anterior, se le denomina firma espectral a las características y comportamiento diferencial de la radiancia reflejada o emitida por el objeto presente en la superficie que se ubican en distintos rangos del EE. A simple vista, nosotros los humanos solo somos capaces de percibir el rango espectral visible ($\lambda = 0.4$ a $0.7 \mu\text{m}$) que corresponde a los colores azul, verde y rojo; sin embargo, a través de los sensores ópticos electrónicos se registra la energía de las regiones infrarroja reflejada y térmica, las cuales permiten visualizar características particulares de objetos, materiales y fenómenos presentes en la biósfera (p. ej. salud, humedad y verdor de la planta; temperaturas de los cuerpos, algunos aspectos de los fenómenos hidrometeorológicos, entre otros) que son inapreciables en la región del espectro visible (Fallas, 2003).

I.1.1.1 Respuesta espectral de la vegetación

Dada la variación dinámica de la estructura que presenta la vegetación, la firma espectral puede variar dependiendo de la fecha en que es tomada la imagen sujeta a análisis debido al comportamiento fenológico estacional que presenta la cobertura vegetal, así como a otros factores tales como los tipos de pigmentos y estructura de las hojas, además del contenido de humedad que contienen las plantas (Hernández, 2011).

La cantidad y el tipo de los pigmentos foliares afectan directamente a las longitudes de onda del espectro visible (0.4 a 0.7 μm) ya que absorben la energía solar, mientras que la complejidad estructural de las hojas aumenta la reflectividad hacia la zona del infrarrojo cercano (0.8 a 1.1 μm) y los rangos que puedan registrarse entre 1.4 a 1.8 μm (infrarrojo medio) dependen del contenido de agua entre y dentro de las células de las plantas (Alonso *et al.*, 1999).

También la proporción y geometría de las hojas, la lignina y el efecto del suelo afectan la reflexión del EE provocando diferentes respuestas espectrales debido a las distintas condiciones que presenta la cubierta vegetal.

Las características espectrales se obtienen de la clasificación de los valores que contienen los píxeles de una imagen digital, los cuales se definen a través de librerías espectrales o bien por los datos contenidos en la imagen de estudio (Hernández *et al.*, 2009), cabe mencionar que es importante hacer muestras de campo para corroborar que la respuesta espectral corresponde al tipo de vegetación asignada.

En el caso de la vegetación la respuesta espectral depende de su estructura, lo cual resulta una característica importante para el análisis del Índice Normalizado Diferencial de la Vegetación que se encuentra representada por valores pre-establecidos.

I.1.1.2 Índice Normalizado Diferencial de la Vegetación

El Índice Normalizado Diferencial de la Vegetación (NDVI, por las siglas en inglés de Normalized Difference Vegetation Index) permite identificar las áreas con presencia de vegetación, a la vez, ayuda a diferenciar las zonas que presentan deforestación, suelos compactados y rocosos y áreas degradadas, puesto que su principal objetivo es determinar los niveles de estrés hídrico (contenido de agua) de la vegetación (Córdova, 2013). Mediante el cálculo de este índice se identifican, cuantifican y analizan los sectores que han presentado cambios en la estructura de la vegetación con respecto a un periodo de tiempo (Córdova, 2011).

El NDVI permite conocer el estado en el que se encuentra la vegetación, es decir, su condición, cantidad y desarrollo observados en la superficie terrestre, como indicador de equilibrio del ecosistema (Meneses, 2011/2).

Este índice es un parámetro calculado a partir de los valores de reflectancia a través de dos partes del espectro electromagnético utilizando la longitud de onda roja (0.63 - 0.69 μm) y la cercana al infrarrojo (0.77 - 0.90 μm), puesto que las plantas más sanas tienden a absorber gran cantidad de la onda roja y a reflejar la mayor parte de la onda cercana al infrarrojo (NASA, 2007, citado por Soto *et al.*, 2012).

Este cálculo es aplicado a las comunidades vegetales para medir la relación que existe entre la energía absorbida y la emitida por los objetos; como índice no dimensional,

sus valores oscilan entre -1 y 1, donde los valores que están por debajo de 0.1 corresponden a cuerpos de agua y a suelo desnudo, mientras que los valores más altos indican alta actividad fotosintética, es decir, áreas con vegetación (Meneses, 2011/2). Para ser más precisos, los valores de cero o muy cercanos a -1 indican cuerpos y/o áreas que no tienen la capacidad de reflejar la onda cercana al infrarrojo lo que significa ausencia de vegetación (como cuerpos de agua) puesto que la luz roja es absorbida por la superficie, por el contrario, si el valor es muy cercano a 1 indica presencia de vegetación sana, mientras que los valores intermedios o por encima de cero representan tierra o vegetación con muy baja actividad fotosintética, para el cálculo del NDVI se utiliza la siguiente ecuación (Soto *et al.*, 2012):

$$NDVI = \frac{NIR - Rojo}{NIR + Rojo}$$

Donde:

NIR (Near Infrared) = es la reflectancia espectral del canal infrarrojo cercano (μm)

Rojo = representa la reflectancia en el canal rojo del visible (μm)

Esta fórmula indica que existe una relación inversa entre el valor de reflectancia de estas bandas, por lo que es posible su uso para discriminación de cubiertas vegetales.

Estos valores se obtienen del valor de reflectancia contenidos en la imagen satelital.

Para el cálculo del NDVI se requiere del uso de imágenes de satélite como las que proporciona el programa Landsat, las cuales se pueden adquirir de manera gratuita.

I.1.1.3 LANDSAT

Landsat (Land = Tierra y Sat = satélite) es un programa cuyo objetivo es estudiar y observar el planeta (Tierra); éste se constituye por una serie de satélites gestionados por la NASA y el Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS) y a partir del año 1972 se puso en órbita el primer satélite con la finalidad de registrar los cambios presentes en la superficie terrestre visualizados desde el espacio, este sistema está diseñado para operar y observar a la Tierra repetidas veces con una resolución moderada (Ariza, 2013).

El programa Landsat se dividió por fases, la primera constituida por el lanzamiento de las series 1, 2 y 3 efectuados entre los años 1972 y 1978 los cuales presentaban un equipo formado por un explorador de barrido multiespectral MSS (Multispectral Scanner) equipado con un conjunto de tres cámaras vidicon RBV (Return Beam Vidicon). La segunda fase fue la generación de los Landsat 4 y 5 en los años 1982, 1985 respectivamente con el MSS además de presentar un nuevo sensor denominado TM (Thematic Mapper) diseñado para proporcionar información con mayor resolución espacial, espectral y radiométrica. Para el año 1993 se intentó el lanzamiento de la serie 6, el cual no se logró debido a fallas presentadas en la misión, por lo tanto, el siguiente fue la serie 7 lanzado en 1999 que presenta una versión mejorada a comparación de las primeras versiones con un sensor más sofisticado (ETM+) el cual presenta ocho bandas una de ellas pancromática (canal 8) (ver figura 3).

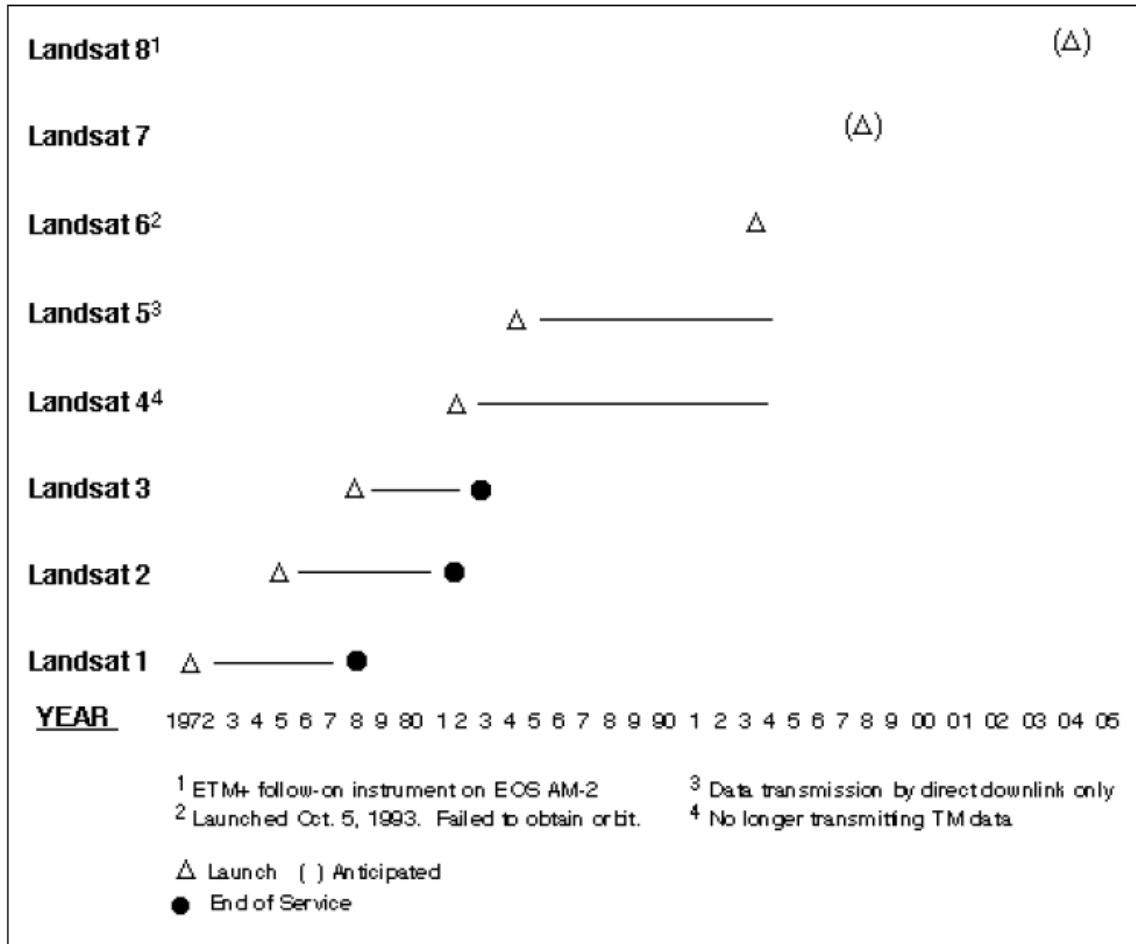


Figura 3. Evolución del programa Landsat
 Fuente: Fernández *et al.*, 2001

Con respecto a la resolución espectral de cada una de las 8 bandas que presenta Landsat 7 se muestra la tabla 1 con las propiedades correspondientes y sus aplicaciones. Cabe mencionar que cada banda presenta diferentes longitudes de onda las cuales se utilizan para distintos fines.

Tabla 1. Propiedades y aplicaciones de las bandas de Landsat 7

Landsat 7			
Banda	Ancho (μm)	Resolución	Aplicaciones
Band 1 Blue	0.45 - 0.52	30 metros	Diferenciar el suelo de la vegetación, así como entre la vegetación de coníferas y decidua. También permite mapear las aguas costeras
Band 2 Green	0.52 - 0.60	30 metros	Mapear la vegetación y la calidad de agua
Band 3 Red	0.63 - 0.69	30 metros	Diferenciar especies vegetales, áreas urbanas, zonas agrícolas y calidad de agua
Band 4 NIR	0.77 - 0.90	30 metros	Delinea cuerpos de agua, así como el mapeo geomorfológico y geológico y facilita la identificación de áreas de incendios y áreas húmedas
Band 5 SWIR1	1.55 - 1.75	30 metros	Facilita la diferenciación entre nubes y nieve, usos de suelo y medidas de humedad de la vegetación
Band 6 TIR	10.40 - 12.50	60 metros	Mapear las propiedades termales del suelo, así como el estrés térmico en plantas, entre otros
Band 7 SWIR2	2.09 - 2.35	30 metros	Facilita la identificación de minerales y permite el mapeo hidrotermal
Band 8 Pan	0.52 - 0.90	15 metros	Principalmente se utiliza para identificar infraestructuras urbanas y rasgos hidrológicos

Fuente: modificada de Chuvieco, 1995

Actualmente se encuentra en órbita el octavo satélite de la versión denominada “Landsat Data Continuity Mission” (LDCM) renombrado como Landsat 8 lanzado el 11 de febrero de 2013, compuesto por dos segmentos (USGS, 2013, citado por Ariza, 2013):

1. Cuenta con dos sensores como capacidad de carga, el primero denominado Operational Land Imager (OLI) y el segundo como Thermal Infrared Sensor (TIRS) que consta de un sensor térmico infrarrojo.
2. El sistema terrestre tiene la capacidad para operar (planificar y programar) el LDCM al mismo tiempo que distribuye y administra los datos.

Debido a los nuevos instrumentos de barrido presentes en este satélite (OLI y TIRS) se obtiene una mejor calidad y resolución de los datos permitiendo obtener información más detallada, así mismo facilita la detección de los cambios que presenta la superficie.

Consta de nueve bandas espectrales con 30 metros de resolución. Una banda nueva (1) que facilita el estudio de los sistemas costeros y aerosoles. La banda 9 (nueva) sirve para la detección de cirrus. A excepción de las bandas anteriores el canal 8 (pancromática) cuenta con una resolución de 15 metros, mientras que las bandas térmicas 10 y 11 proporcionan información sobre la temperatura de la superficie (a 100 metros de resolución); debido a todas las características mencionadas, la escena (la imagen de satélite) tiene un tamaño aproximado de 170 Km de Norte a Sur y 183 Km de Este a Oeste (Ariza, 2013).

Los productos generados por los satélites Landsat constituyen uno de los componentes que conforman a los Sistemas de Información Geográfica para llevar a cabo el análisis de los espacios geográficos.

I.1.2 Sistema de Información Geográfica (SIG)

Dados los avances tecnológicos que se han venido perfeccionando desde la antigüedad y en respuesta a las necesidades e intereses de conocer el entorno, se ha hecho más frecuente el uso de la información geográfica (IG) como principal insumo de los denominados Sistemas de Información Geográfica (SIG) los cuales posibilitan el empleo de información espacial mediante software o programas que permiten el análisis del espacio y cuyo uso puede contribuir a responder preguntas relacionadas con un determinado espacio, tales como: “¿Qué hay?, ¿Cuánto hay? y ¿Dónde se encuentra ubicado? (Pérez *et al.*, 2011).

En 1989 especialistas de los SIG lo definieron como...“sistema de hardware, software, datos, personas, organizaciones y convenios institucionales para la recopilación, almacenamiento, análisis y distribución de información territorial”...; años después, Burrough en 1998 los definió con base en tres rasgos característicos, de acuerdo con el funcionamiento y componentes del sistema: 1) “poderosa caja de herramientas para recoger, almacenar, recuperar, transformar y visualizar datos del mundo real”, 2) “un sistema de base de datos en el que la mayoría de éstos están indexados geográficamente y con los cuales se puede realizar un conjunto de procedimientos con el objetivo de dar respuesta a consultas sobre entidades espaciales en la base de datos, y 3) como “entidad institucional con una estructura organizativa que integra tecnología con bases de datos, expertos y ayuda económica continuada”. Para el año 2003, Chrisman lo define con base a las actividades que permite realizar: ...“acciones organizadas con que las personas miden aspectos de fenómenos y procesos geográficos para enfatizar cuestiones espaciales, entidades y relaciones”... (*Ibid*).

Olaya (2012) integra y presenta sus conceptos definiendo al SIG como una herramienta indispensable para el estudio de la información geográfica, puesto que no solo se integra por tecnología sino que además, la sociedad forma parte del pilar fundamental; gracias a la integración de sus diferentes componentes, no hay mejor herramienta que el SIG para el análisis de datos geográficos ya que presenta una gran capacidad para implementar algoritmos y operaciones que permiten el manejo de los datos de partida y así mismo la creación de la cartografía que puede ser plasmada en un papel o, en su defecto, de manera digital. El mismo autor también argumenta que el software contiene un gran potencial que brinda el perfecto manejo de la información con la finalidad de dar solución a

todas las necesidades que se presentan, donde la integración de sus componentes en especial el software y hardware permiten la adquisición, mantenimiento y uso de datos cartográficos con fácil utilización pero, sin embargo, cabe destacar que todos los elementos o componentes del SIG se engloban para desempeñar una particular e importante función como por ejemplo: la captura, el análisis, almacenamiento, edición y representación de datos georreferenciados.

Por lo tanto, los SIG se definen como un sistema que integra tecnología informática, persona e información geográfica, cuya principal función es capturar analizar almacenar, editar y representar datos georreferenciados.

En conclusión, los SIG permiten conocer información espacial desde diferentes aspectos representando al mundo real, al mismo tiempo que contribuye para la toma de decisiones; como aplicación, permite el almacenamiento y producción de mapas, puesto que mediante el software se desarrolla la creación a través de la entrada, procesamiento, salida y representación de los datos (Rosete *et al.*, 2003).

Los sistemas de información geográfica están conformados por los siguientes componentes (ver figura 4): tecnología (software y hardware), datos, métodos, personas, ideas y red, cabe mencionar que si algún componente llega a faltar, no sería posible un SIG ya que cada uno de ellos juega un papel fundamental (Pérez *et al.*, 2011).

Componentes básicos de un SIG

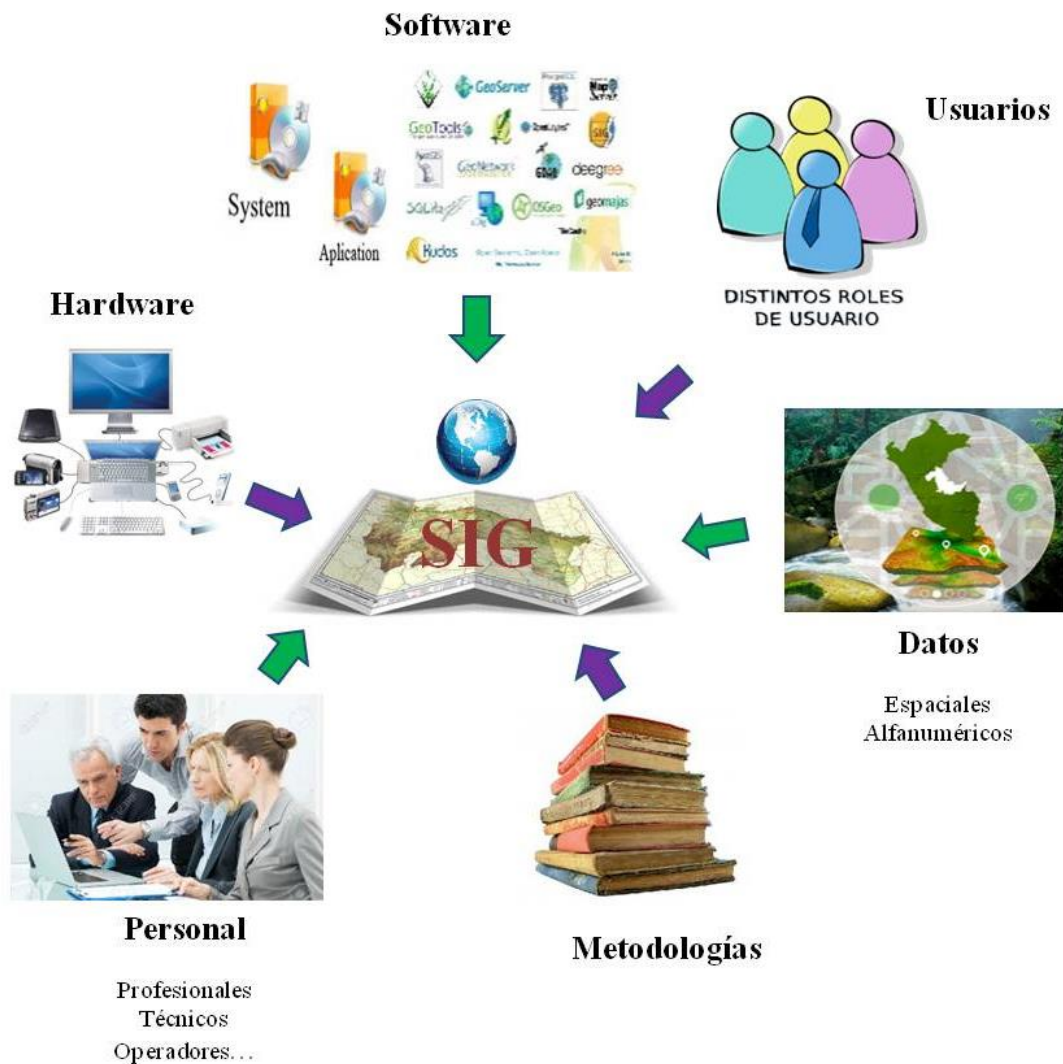


Figura 4. Componentes de los Sistemas de Información Geográfica (SIG)
Fuente: Imagen adaptada de Longley *et al.*, 2005, citado por Pérez *et al.*, 2011

El mundo real como objeto de estudio de los SIG, es representado de manera digital como entidades muy irregulares y complejas, sin embargo, tienen la capacidad de trabajar con estructuras matriciales más complejas como datos en formato raster y vector (Iturbide, 2011) en las cuales, los elementos que existen en la naturaleza pueden ser representados

mediante formas geométricas, es decir, formato vector que consiste en la representación del objeto a través de puntos, líneas o polígonos, o bien, mediante celdillas o píxeles con información (formato raster). La representación gráfica del objeto está en función de la forma de interpretar el espacio.

Los SIG como geo-tecnología son una herramienta poderosa de diagnóstico, análisis y simulación como subsidio a la toma de decisiones y al monitoreo de fenómenos o actividades (Doetzer *et al.*, 2008). Para el presente trabajo los SIG nos permitirán determinar los cambios de temperatura que se han presentado en la zona de estudio para identificar la presencia de islas de calor.

I.1.3 Islas de Calor (IC)

Las islas térmicas o islas de calor, también denominadas por diferente círculos científicos como islas de calor urbano, se refieren al cambio de temperatura que existe en la superficie así como en el aire en áreas urbanas debido a la sustitución de la vegetación original por superficies impermeables a consecuencia de la actividad humana; las superficies como concreto, asfalto, metales, cerámicos y vidrios provocan un aumento en la temperatura originando un gradiente térmico (vertical: atmosférico y horizontal: superficial) principalmente en zonas densamente pobladas como ciudades y entornos peri-urbanos o periferia (Córdova, 2013). Las islas de calor también pueden definirse como clima urbano ya que presentan un gradiente térmico que altera el balance hídrico y radiativo superficial (Córdova, 2011).

Desde la perspectiva de la irradiación y la superficie de ocupación urbana, se puede decir, que la IC es la relación que existe entre la superficie natural y la urbana, en la cual los factores geométricos urbanos generan el fenómeno conocido como cañón urbano, que

interviene en la intensificación de las islas de calor, es decir, en la puntualización de sitios específicos en donde se acentúa tal condición.

De acuerdo con la orientación (horizontal o vertical) se pueden distinguir dos tipos de islas de calor (Tumini, 2011): 1) Isla de Calor Urbano Atmosférico (ICUA) y 2) Isla de Calor Urbano Superficial (ICUS) las cuales se diferencian por los factores que la generan.

1) Isla de Calor Urbano Atmosférico.

Esta se refiere a la diferencia de temperatura del aire entre la zona urbana y la zona rural en donde se manifiesta con mayor intensidad desde la tarde hasta el amanecer. Sin embargo, su pico máximo se presenta por la noche, aunque cabe mencionar que en algunos casos incluso se produce en el amanecer debido a la liberación de calor de la infraestructura urbana. A su vez, la ICUA se manifiesta de dos tipos (*Ibid*):

- Se presenta en la capa de aire a nivel de suelo hasta los techos o copa de los árboles aproximadamente, afectando directamente a los habitantes del lugar.
- Se produce desde la capa máxima del nivel anterior (techos o árboles) hasta donde abarca el paisaje urbano, es decir hasta donde éste influye en la temperatura del aire, por lo general no excede los 1.5 Km de altura.

2) Isla de Calor Urbano Superficial.

Se le denomina a la diferencia térmica entre la superficie artificial (pavimento, edificios, metales, etc.) y la superficie natural (vegetación, cultivos, entre otros). Esta diferencia se presenta con mayor intensidad durante el día en la época de verano, sin embargo, cabe mencionar que este fenómeno puede producirse tanto en el día como en la noche. La presencia de nubes bajas y vientos débiles provoca la persistencia de la temperatura alta en la superficie a comparación de la masa de aire

(Soto *et al.*, 2012). Para la medición de las islas de calor superficial existen distintos métodos: los de medición directa y los de medición indirecta, modelos numéricos o métodos de estimación empíricos. El método más usado es el de medición directa mediante la estimación de la temperatura superficial, que se obtiene a través de mapas térmicos o imágenes radiométricas (Tumini, 2011).

Ya sea vertical u horizontal las islas de calor son fenómenos que se perciben por el aumento de temperatura entre una zona rural y una zona urbana, este aumento se debe principalmente al desarrollo de centros urbanos y cambios en la vegetación original debido a que se presenta una alteración en las propiedades térmicas e irradiances de la superficie. Es importante mencionar que los efectos de este fenómeno se limitan a una micro-escala o bien a cambios climáticos locales que llegan a afectar a la salud y perjudicar los elementos ambientales del lugar (Soto *et al.*, 2012); la intensidad depende de factores como el tamaño y morfología urbana, topografía y características climáticas (viento, temperatura, inversión térmica, etc.), además de las actividades antrópicas.

Es evidente que el aumento de la temperatura promedio de una zona se debe a las modificaciones presentadas en la superficie como consecuencia de las actividades antrópicas, que van desde la deforestación hasta el establecimiento de zonas urbanas implicando un cambio de uso de suelo.

Con respecto a las consecuencias que pueden observarse por la presencia de islas de calor, es el aumento del uso de aires acondicionados los cuales a su vez pueden contribuir a elevar la temperatura ambiental debido al funcionamiento de sus motores; otra de las consecuencias puede ser la alteración de la periodicidad de las estaciones del año, es decir, el descenso del frío en invierno puede adelantar la primavera y el aumento del calor en

verano puede retrasar el otoño, con los consecuentes desequilibrios ecosistémicos, como por ejemplo, el calor facilita la reproducción de insectos que pueden actuar como vectores de enfermedades propias de la población humana lo cual se traduce en problemas de salud pública (Fernández, 2009).

I.1.4 Cambio de Uso de Suelo

Tomando como base lo que establece la Procuraduría Federal de Protección al Ambiente (PROFEPA, 2013), el uso de suelo es el empleo del territorio incluyendo su cubierta vegetal, por lo tanto, el cambio de uso de suelo se refiere a la modificación realizada por el hombre a través de la remoción total o parcial de la vegetación silvestre para hacer uso diferente a la propia dinámica ecosistémica local, convirtiéndolo en un nuevo uso. En otras palabras, se refiere a la modificación de la estructura de la vegetación original de un espacio geográfico. En la actualidad este fenómeno se ha realizado para la creación y ampliación de zonas agrícolas y urbanas, como consecuencia del desarrollo y el aumento de la población. Es importante mencionar que también se considera cambio de uso de suelo cuando un cuerpo de agua deja de serlo y se convierte en zona urbana, pastizal o zonas agrícolas ya que se modifica el uso original.

Con base en algunos autores, se considera que el cambio de uso del suelo se debe a la interacción de factores económicos, políticos y ecológicos (Geist y Lambin, 2001, citado en Pineda *et al.*, 2009). Otros autores opinan que el escaso conocimiento de la relación entre el cambio del uso del suelo y aspectos socioeconómicos dificulta dicha interpretación (Nagendra *et al.*, 2004, citado en Pineda *et al.*, 2009). Lo anterior se complementa con los estudios de Lambin (1997) quien considera como principal causa del cambio de uso de suelo a los aspectos demográficos. Así mismo, Mahar y Schneider (1994) indican que el

principal motor de cambio es el avance de la frontera agrícola mientras que Reyes *et al.* (2003) consideran que parte del problema son los programas de subsidio al campo (citado en Pineda *et al.*, 2009).

Estos cambios provocan alteraciones en el clima o microclima, así como en la estructura y composición bioquímica del suelo, además de los componentes hidrológicos asociados afectando principalmente a la biodiversidad, por consecuencia a los servicios ecosistémicos. Estas modificaciones impactan, en general, de manera negativa y drástica a la sociedad en términos de limitar las posibilidades de desarrollo socioeconómico (Kolb, 2013).

Como se mencionó anteriormente, el cambio de uso de suelo es un fenómeno ambiental muy importante que requiere de estudios sobre sus orígenes y consecuencias. Para lo anterior actualmente se cuenta con diferentes tipos de herramientas y técnicas que permitan llevar a cabo la medición y el monitoreo de dichos cambios.

I.1.4.1 Medición y monitoreo

El SIG es una herramienta que permite la medición de cambios de uso de suelo a través de sus distintas funciones, ya que reconstruye con cierta precisión los cambios de uso de suelo, además que gracias a esto es posible identificar aquellas áreas donde se presenta mayor modificación. Los estudios sobre la medición de estos cambios se enfocan principalmente a lo largo de un periodo de tiempo específico.

A través de los SIG, la modelación del cambio de cobertura y uso de suelo (CCUS) ha sido reconocida como una herramienta importante para el manejo de ecosistemas puesto que permite identificar las zonas con mayores conflictos ambientales potencialmente

asociados al cambio de uso de suelo, además, permite investigar y conocer los factores asociados a este proceso en un espacio y tiempo determinados (Kolb, 2013).

Tomando en cuenta lo anterior, el análisis multi-temporal permite identificar los cambios que surgieron durante el tiempo (énfasis en un periodo específico), deduciendo la evolución del espacio geográfico, así como las repercusiones ocasionadas por la acción humana sobre el medio natural (Ruíz *et al.*, 2013).

Finalmente, se puede decir que para el estudio del cambio de uso de suelo y vegetación, así como su evaluación, es necesario utilizar las herramientas del SIG en sus diferentes modalidades, ya que permite cuantificar las áreas con tendencias posibles de deforestación, además que nos da a conocer la ubicación exacta de los lugares en proceso de cambio (Trucíos *et al.*, 2013). La deforestación es una acción antropogénica que destruye la estructura de la vegetación generando degradación, fragmentación y pérdida de biodiversidad; sin embargo, la velocidad es tal, que los sistemas naturales pierden los atributos de resistencia, así como la capacidad de resiliencia, de tal forma que los efectos negativos que derivan del cambio de la cobertura vegetal son, generalmente, irreparables ecosistémicamente.

Independientemente de las consecuencias sobre la estructura y composición bioquímica del suelo, el cambio de uso del mismo también tiene repercusiones en favorecer el aumento de la temperatura tanto ambiental como superficial asociada, lo cual se observa con claridad en las áreas urbanas y otras zonas antropizadas (áreas de cultivo, ganadería, carretas, entre otras).

I.1.4.2 Relación del cambio de uso de suelo con el aumento de temperatura

La urbanización implica alteraciones de las condiciones bio-físico-químicas del suelo local, lo que consecuentemente modifica las propiedades térmicas de la superficie del mismo. Esto permite reconocer que el aumento de la temperatura es directamente proporcional a la modificación del uso de suelo y vegetación correlacionado con el incremento de la mancha urbana, este efecto se puede observar principalmente en las grandes ciudades donde la modificación del ambiente natural ha marcado la presencia de islas de calor provocando problemas de salud. Algunos estudios demuestran que la vegetación tiene una influencia determinante sobre la variación del microclima, puesto que, debido al efecto sombra permite la reducción de la temperatura; otro de los efectos más importantes es la evapotranspiración que posibilita la disminución de ésta mediante la devolución de agua en estado gaseoso a la atmósfera (Soto *et al.*, 2012).

En otras palabras, cualquier microclima se ve impactado de manera inmediata al presentar cambios en el uso de suelo nativo del lugar, esto se debe a la diferencia de respuesta térmica al interactuar los procesos de la atmósfera con el ambiente. La heterogeneidad de la superficie se caracteriza por presentar distinta respuesta espectral ya que cada elemento y/o componente contiene diversas propiedades que hacen que la emisión o absorción de la energía se presente de diferente forma, promoviendo la generación de variados microclimas (García *et al.*, 2012). Entonces se dice que la modificación de la cubierta vegetal original conduce a un clima térmico modificado dando lugar a la presencia del fenómeno de islas de calor.

La sustitución de la cubierta vegetal original por superficies impermeables tales como asfalto, concreto, ladrillo entre otros, alteran el balance hídrico y radiativo

superficial¹, lo que conduce al aumento de la temperatura, debido a que los materiales de acabado del suelo tienen una incidencia fundamental en el efecto de isla de calor (Córdova, 2011).

En este sentido, en el presente trabajo de investigación se tomó en cuenta las consecuencias que conlleva el cambio de uso de suelo en términos del aumento de la temperatura, particularmente en lo que se relaciona con la presencia de islas de calor dentro de áreas naturales protegidas lo cual tiene relación con los conceptos de las medidas de adaptación y mitigación frente al cambio climático.

I.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Las alteraciones de la vegetación así como el cambio de uso de suelo ocasionan desequilibrios tales como las islas de calor que a su vez generan impactos en el ambiente, los cuales dan origen a un nuevo microclima que puede provocar problemas en la condición de la salud humana, así como en la disminución del confort, aumento del estrés hídrico, aumento de la dispersión de contaminantes y desplazamiento del aire local, además de presentar implicaciones prácticas en la conservación de agua y energía (García *et al.*, 2012).

Las condiciones que se exponen en este trabajo sobre el estudio de las islas de calor se puede abordar desde dos perspectivas: la primera como intromisión del hombre en ambientes con condiciones naturales, es decir, por intervención humana directa que no

¹ Balance radiativo. Se refiere al equilibrio de la cantidad de radiación solar entrante en la atmósfera con la radiación solar reflejada saliente más la radiación infrarroja térmica saliente. Es decir, la radiación solar entrante debe ser igual a la radiación solar saliente. Toda alteración de este balance ya sea por causas naturales u originado por el hombre, es un forzamiento radiativo y supone un cambio de clima y del tiempo asociado (Trenberth *et al.*, 2009).

implique necesariamente un cambio de uso de suelo (p. ej. el aprovechamiento de la madera de un sistema silvestre) y, la segunda, como afectación climática por el desarrollo de actividades antrópicas, es decir, una vez que se ha llevado a cabo el cambio de uso de suelo existe un efecto sinérgico de las afectaciones causadas por diferentes actividades (p. ej. establecimientos de centros de población, carreteras, industrias, entre otros tipos de infraestructura urbana) (Carreras *et al.*, 1990), no obstante, es necesario resaltar que la afectación climática se debe a la alteración de los ecosistemas como consecuencia de la injerencia antrópica.

El presente trabajo aborda el tema de islas de calor desde la segunda perspectiva, es decir, como afectación en el clima local debido a la modificación antropizada de la cobertura vegetal a través del cambio de uso de suelo dentro del Área Natural Protegida (ANP) Villa Allende. Sin embargo, en el proceso de análisis de la información también se considera al conjunto de variaciones temporales y espaciales propias de la estacionalidad.

A nivel nacional se evidencia la pérdida de cubierta vegetal que de acuerdo con el INEGI se deforesta anualmente alrededor de 479 mil hectáreas de bosques y selvas (citado en Gaceta Parlamentaria PVEM, No 4497-II, 2016) como resultado del cambio de uso de suelo orientado al desarrollo de actividades que representen mayor satisfacción social. Sin embargo, la disminución de esta cobertura puede reducir la recarga de mantos freáticos, aumentar las tasas de erosión y de azolve de cuerpos de agua, así como incrementar los riesgos de inundaciones y cambiar las condiciones climáticas (Ramírez *et al.*, 2013); como consecuencia de estas acciones resulta la transformación y fragmentación de los ecosistemas, alterando su integridad y el equilibrio de los bienes y servicios ambientales.

Históricamente el ANP Villa Allende ha sido sometida a severos procesos de deforestación y cambio de uso de suelo, promovidos principalmente por la expansión y establecimiento de nuevos asentamientos humanos, apertura de áreas para uso agrícola y pecuario, acciones que conllevan a la desaparición de los ecosistemas forestales maduros y su diversidad biológica. Actualmente existe un proceso de lotificación que se está extendiendo, con el cual se ha provocado que de 1481 especies que equivale al 5.58% respecto a México y el 18.97% respecto a la flora de Chiapas, existan 31 especies en la Norma Oficial Mexicana (NOM-059-SEMARNAT-2010), de las cuales seis se encuentran en peligro de extinción (P), 19 están amenazadas (A) y cinco bajo protección especial (Pr) (CONANP - UNICACH, 2014).

En este trabajo se define como principal problema el aumento de la temperatura como consecuencia del cambio de uso de suelo en el ANP Villa Allende, conduciendo a la aparición de islas de calor que pueden generar cambios del micro clima local impactando negativamente a la biodiversidad y a otros servicios ecosistémicos incluyendo el confort y la salud humanas.

La alteración del estado natural del ANP debido a las acciones antes mencionadas, contribuyen al cambio de temperatura local y con ello un impacto directo sobre la prestación de servicios ecosistémicos del área, por lo tanto, se pretende identificar las islas calor y sus variaciones temporales y espaciales en los dos años en estudio.

I.3 ANTECEDENTES

1) MONITOREO DE COBERTURAS E ISLAS DE CALOR EN SANTIAGO DEL ESTERO (Capital).

En este trabajo se analizó el proceso de urbanización a través de la reconstrucción temporal de la ciudad, a efecto de mapear las coberturas vegetales e infraestructura urbana, y complementarlas con cartografía de temperaturas derivada de mediciones satelitales

La metodología para la transformación de los datos satelitales Landsat se basó en los algoritmos propuestos por los módulos de IDRISI Taiga y QuantumGIS, ambos sistemas de procesamiento de imágenes satelitales y SIG raster/vectorial. Los resultados se modelaron mediante el uso de los principales operadores que ofrece IDRISI Taiga y programas de análisis estadísticos que utilizaron como datos a parte de los resultados extraídos mediante SIG.

Este estudio se realizó para la Ciudad Capital de Santiago del Estero que se ubica en el Noroeste de la República Argentina. Su metodología se basó en el cálculo del Índice Normalizado de Diferencias Vegetales (NDVI) para un fragmento del sector Sur-Oeste de la ciudad capital correspondientes para los años 1987 y 2010 generando un perfil de NDVI para la comparación de los años en estudio.

2) IMPACTOS DE LAS ISLAS TÉRMICAS O ISLAS DE CALOR URBANO, EN EL AMBIENTE Y LA SALUD HUMANA. ANÁLISIS ESTACIONAL COMPARATIVO: CARACAS, OCTUBRE-2009, MARZO-2010 (Córdova, 2011).

Se seleccionaron dos imágenes Landsat 7 ETM+, correspondientes al final del período húmedo en octubre-2009 y al período seco en marzo del 2010 para Caracas, la Ciudad Capital de la República Bolivariana de Venezuela. En la selección temporal de las imágenes se consideró el comportamiento de variables climáticas como la precipitación y la radiación solar incidente, ya que juegan un papel fundamental en el calentamiento y la mitigación de la temperatura superficial.

Al seleccionar imágenes satelitales correspondientes a estos meses, se compara dos escenarios contrastados que permite observar, precisamente, cuáles serían los sectores en donde prevalece una alta temperatura superficial, aún en el mes de octubre bajo condiciones climáticas que favorecen la mitigación y bajo condiciones inversas en el mes de marzo.

Dentro de la metodología se realizó lo siguiente:

- Conversión de los Números Digitales (DN) en radiancia espectral utilizando la siguiente ecuación:

$$LA = GAIN * 6 BAND DN + OFFSET$$

Para Landsat 7 ETM+.

$$L_{\square} = 0.0370588 * 6 - 2 Band DN + 3.2$$

Donde:

L_{λ} = Es la radiancia espectral de los píxeles de la banda térmica expresados en $W/(m^2sr\mu m)$

Gain/DN= Es la variación en la función de conversión radiancia/DN según el valor de los píxeles de la imagen.

DN= Es el valor de un determinado píxel (0 a 255) y Offset= Es la intercepción de la función de conversión de radiancia/DN. Los valores de ganancia (Gain) y compensación (Offset o BIAS) pueden ser encontrados en el metadato de la imagen.

3) VARIABILIDAD TÉRMICA EN LA REGIÓN NORORIENTAL DE LA PENÍNSULA DE BRUNSWICK, MAGALLANES, CHILE, EMPLEANDO DATOS Landsat (Olave *et al.*, 2008).

El objetivo de este trabajo es disponer de una primera aproximación al cálculo de la temperatura superficial (TS) de la zona nororiental de la península de Brunswick, en la región de Magallanes, además de mostrar la variabilidad térmica que existe en un momento determinado.

Para este trabajo se seleccionó la imagen Landsat 5 TM del 10 de febrero de 1986, obtenida del Global Land Cover Facility (GLFC2, según sus siglas en inglés).

Para el procesamiento de datos se utilizó el software Erdas Imagine, y se calculó lo siguiente:

- La radiancia espectral emitida mediante la siguiente fórmula:

$$L = G * ND + B$$

Donde:

L= Es el valor de píxel expresado en radiancia

ND= Nivel digital del píxel

G= Es el factor de gain y en este caso toma un valor de 0.551582

B= Es el factor de bias y para este caso su valor es de 1.2377996

Los factores de calibración Gain (G) y Bias (B) se obtuvieron del metadato de la imagen satelital.

- Cálculo de la temperatura brillo mediante la inversión de la ecuación de Planck, ver la siguiente ecuación:

$$T = \frac{K_1}{\ln\left(\left(\frac{K_2}{L}\right) + 1\right)}$$

Donde:

T= Es la temperatura de brillo superficial

L= Es el valor de radiancia

K₁= Es la constante 607.76

K₂= Es la constante 1260.56

Las constantes utilizadas son específicas para Landsat TM5.

El área de estudio corresponde a la península de Brunswick, ubicada en los 52°17' y 53°35' de latitud sur y los 70°23' y 71°33' de longitud oeste, en el sector centro-oriental de la región de Magallanes, incluye a la ciudad de Punta Arenas en su parte media.

4) TEMPERATURA DE SUPERFICIE EN EL VALLE DEL RÍO NEUQUÉN UTILIZANDO IMÁGENES LANDSAT (Cogliati, 2011).

Este estudio presenta el análisis de temperatura superficial obtenida a partir del canal térmico del satélite Landsat 7 ETM+ con escenas que comprenden la zona del valle productivo del Río Neuquén, utilizando los resultados del modelo MODTRAN 42 con datos del re-análisis del NCEP3 para el cálculo de la corrección atmosférica.

Se analizaron imágenes Landsat 7 ETM+⁴ (path 230/row087) correspondientes a los meses de invierno: mayo, junio, julio, así como los de verano: diciembre, enero y febrero (imágenes que contienen una mínima cantidad de nubosidad).

El proceso de análisis incluye corrección radiométrica, corrección geométrica sistemática y corrección de precisión utilizando puntos de control en superficie y un modelo de elevación digital para corregir el paralaje debido a la topografía.

A través de la herramienta operativa de corrección atmosférica, se calcula la temperatura de superficie con un sesgo menor a $0.5 \pm 0.8K$.

Las imágenes satelitales fueron procesadas por medio del software ENVI.

- La radiancia se calculó según lo siguiente:

$$L_S = L_{min} + \left(\frac{D_n}{D_{nmax}} * (L_{max} - L_{min}) \right)$$

Donde:

L_s = Es la radiancia espectral en la banda térmica ($W/(m^2 * ster * \mu m)$) (Landsat Project, 2002)

L_{max} y L_{min} se obtuvieron del archivo de cabecera de las imágenes y en la banda 6, dichos valores son:

$$L_{max}= 17.040$$

$$L_{min}= 0.00$$

La temperatura de brillo al tope de la atmósfera se calcula a través de:

$$T_s = \frac{K_2}{Ln\left(\frac{K_1}{L_s + 1}\right)}$$

Donde:

TS= Es la temperatura efectiva del satélite (temperatura brillo) ($^{\circ}K$)

K_1 y K_2 son constantes de calibración de pre lanzamiento (para Landsat 7 ETM+, $K_1= 666.09 W/(m^2 sr \mu m)$ y $K_2= 1282.71 K$ (Landsat Project, 2002).

- Cálculo del NDVI a partir de la reflectancia de los canales 3 y 4 de las imágenes Landsat.

$$NDVI = \frac{(\rho_4 - \rho_3)}{(\rho_4 + \rho_3)}$$

Donde:

ρ = Es la reflectancia para cada banda λ , calculada según la siguiente ecuación:

$$\rho_{\lambda} = \frac{\pi * L_{\lambda} * d^2}{ESUN_{\lambda} * COS\theta}$$

Donde:

L_{λ} = Es la radiancia espectral en el satélite

d= Distancia al sol

$ESUN_{\lambda}$ = Es la irradiancia exoatmosférica para cada banda λ , (para Landsat 7, Banda 1:1969 W/m²/μm, banda 2: 1840 W/m²/μm (Landsat Project, 2002)

COSθ= Es el coseno del ángulo solar incidente.

5) ESTUDIO DEL CRECIMIENTO URBANO CON RESPECTO AL EFECTO ISLA DE CALOR PARA ESTABLECER LINEAMIENTOS DE GESTIÓN ENERGÉTICO AMBIENTAL EN BOGOTÁ (Gómez *et al.*, 2013).

El proyecto pretende usar herramientas como los Sistemas de Información Geográfica (SIG), Teledetección y Geoestadística para realizar un análisis geográfico a nivel ambiental, socio económico y de infraestructura urbana, que permite establecer las causas de la contaminación térmica generada por el efecto llamado isla de calor urbano.

El proceso metodológico desarrollado en el presente proyecto corresponde principalmente a uno de tipo deductivo, en donde se compilan datos cuantitativos y cualitativos que permiten asociar y analizar información geográfica con respecto a la normatividad del suelo establecido por el POT (Plan de Ordenamiento Territorial) y el PGA (Plan de Gestión Ambiental) de la ciudad de Bogotá.

Se procesaron las imágenes satelitales del satélite Landsat 7, mediante el software Erdas 9.3 para la generación de mapas de isotermas. A su vez, se realizó una superposición de la información obtenida en conjunto con la información cartográfica en el software

ArcGis 9.3 para establecer la relación existente entre acumulación de calor y el uso del suelo.

Ya obtenida la información base, se procedió a la elaboración de mapas temáticos que correlacionaron variables como el uso del suelo y la acumulación de calor. Esta información se obtuvo mediante los mapas de isotermas generados a partir de imágenes satelitales procesadas en el software Erdas 9.3 y después se procedió a vectorizar dichos resultados a través del software ArcGis 9.3. De esta manera, la migración de información raster (imágenes satelitales) hacia estructuras vectoriales (SIG) permitió un adecuado tratamiento cuantitativo de la información, para generar los sitios significativos con alto grado de temperatura, y la participación de los factores que influyen en la generación de las islas de calor en la ciudad de Bogotá.

Tomando en cuenta lo anterior y con base a la revisión bibliográfica se puede afirmar que no existe un trabajo similar al presente estudio en el estado de Chiapas, sino que las investigaciones que guardan alguna relación temática referente a variaciones térmicas en la superficie terrestre abordan el fenómeno de puntos de calor.

Con base en estos antecedentes que coinciden con la metodología adaptada para el presente trabajo, a continuación se exponen los argumentos que soportan la justificación para la realización de esta investigación.

I.4 JUSTIFICACIÓN

Los estudios de islas de calor son de gran importancia, debido a que éstas agudizan el fenómeno de variabilidad de temperatura y cambio climático como efectos derivados principalmente por la pérdida y/o transformación de la cobertura vegetal, ligados directamente con el aumento de la mancha urbana el cual se presenta con mayor frecuencia intensificando el incremento de anomalías térmicas positivas (Durán, 2010) que agravan el cuadro de contaminación y de degradación de la calidad ambiental perjudicando a la población principalmente en ámbitos de salud (Córdova, 2011); aunado a lo anterior, existen evidencias de que la transformación de las coberturas vegetales asociada al cambio del uso de suelo constituye una de las principales amenazas para la biodiversidad en todo el mundo. Por los motivos anteriormente expuestos, se considera que este es un tema que amerita atención prioritaria en materia ambiental, especialmente porque se trata de una Área Natural Protegida que provee diversos servicios ecosistémicos, además de que la ZPFV Villa Allende se encuentra en un proceso de estructuración técnica y administrativa en el cual se requiere de este tipo de información para contribuir a la construcción de un diagnóstico ambiental que facilite el diseño de las acciones necesarias de conservación, las cuales deberán de ser plasmadas en el programa de manejo correspondiente, ya que en la actualidad esta ANP carece de dicho documento.

El resultado de este estudio permite identificar las áreas que representan islas de calor, las cuales se deben enfrentar con retos de conservación de los ecosistemas y la biodiversidad, para evitar daños socio-ambientales; es importante recalcar que el aumento de la temperatura en el ANP Villa Allende impacta directamente a la urbe de Tuxtla

Gutiérrez así como a sus alrededores, no solamente en el microclima sino además en la disposición del recurso hídrico.

Tomando como base los argumentos anteriores, así como las condiciones ambientales particulares de la zona en estudio, se ha desarrollado la hipótesis correspondiente.

I.5 HIPÓTESIS

El reemplazo de la cubierta vegetal primaria por zonas agrícolas, pecuarias y urbanas está generando un aumento en la temperatura superficial y por consecuencia la presencia del fenómeno de islas de calor en diferentes áreas de la ZPFV, Los Terrenos Forestales de Villa Allende.

I.6 OBJETIVOS

I.6.1 Objetivo general

Identificar las islas de calor como consecuencia del cambio de uso del suelo en el ANP Villa Allende para los años 2000 y 2016, a través del análisis de imágenes Landsat

I.6.2 Objetivos específicos

- Estimar la temperatura superficial a través de las imágenes Landsat
- Establecer la relación de la pérdida de la cobertura vegetal y la presencia de islas de calor mediante la aplicación del Índice Normalizado Diferencial de la Vegetación (NDVI)

II. MÉTODOS Y ÁREA DE ESTUDIO

II.1 ÁREA DE ESTUDIO

El ANP Villa Allende se ubica dentro de los municipios de Tuxtla Gutiérrez, San Fernando y Berriozábal en el estado de Chiapas, con una extensión de 21,003.4 ha la cual se distribuye de la siguiente manera: Tuxtla Gutiérrez comprende un 2.24% equivalente a 470.47 ha, Berriozábal 18.36% igual a 3,856.22 ha y San Fernando con un 79.4% (16,676.69 ha) siendo éste el municipio con mayor extensión del ANP en su territorio (INEGI, 2010).

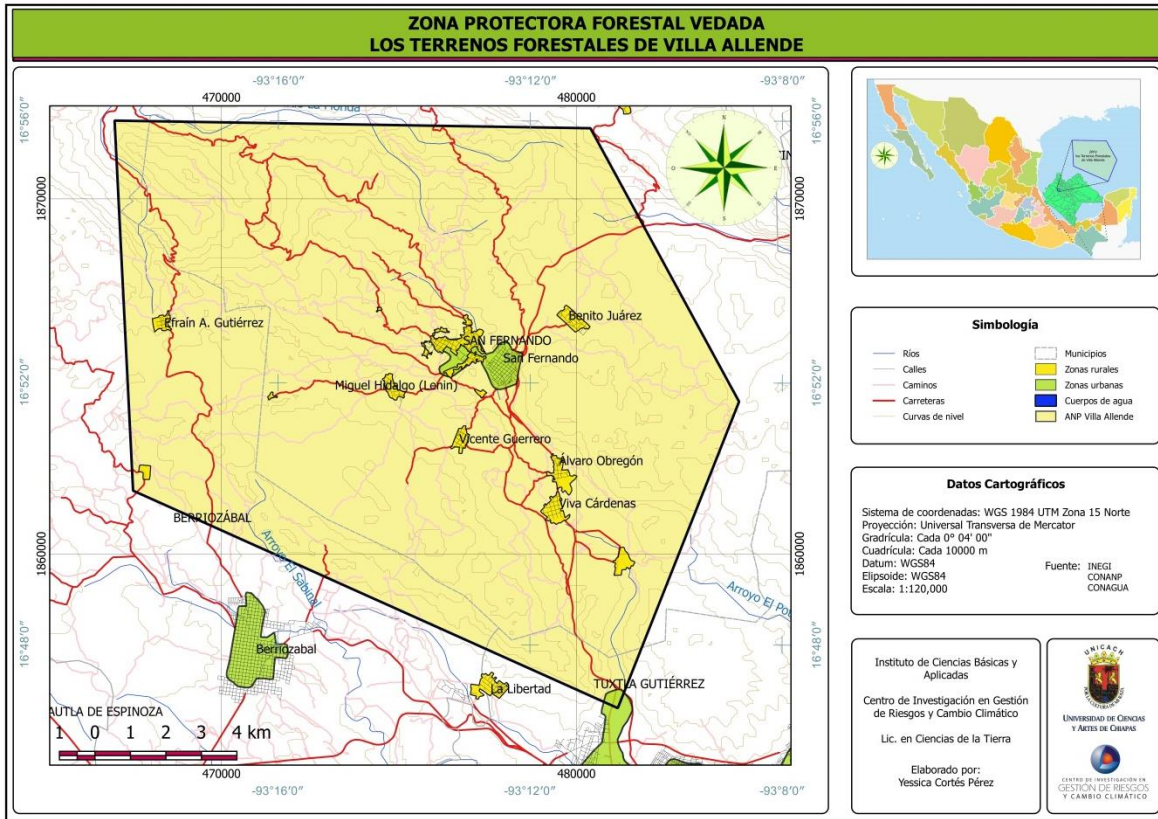
Las coordenadas UTM extremas del ANP son al Norte 1872202.750157, al Sur 1855663.517731, al Este 484580.119255 y al Oeste 466991.455545. El polígono se encuentra delimitado con base en los datos que se presentan en la siguiente tabla (2).

Tabla 2. Coordenadas de los vértices del ANP Villa Allende

Cuadro de construcción						
Puntos de levantamiento			Distancia y rumbos		Coordenadas	
Estación	Hacienda	Vértice	Distancia (m)	Dirección	Eje X	Eje Y
1	Zoteapa	1	13379.15	N 89 - 7 - 10 W	480381.313	1872006.4
2	La Florida	2	10431.488	S 2 - 51 - 46 E	467003.743	1872211.99
3	El Suspiro	3	14960.127	S 65 - 51 - 4 E	467524.744	1861793.52
4	Chacona	4	9271.314	N 21 - 39 - 36 E	481175.641	1855673.19
5	Casas Viejas	5	8793.337	N 28 - 39 - 9 W	484597.681	1864289.86

Fuente: CONANP, 2016

De acuerdo con los datos anteriormente expuestos se presenta la visualización de la ubicación geográfica del área de estudio (ver mapa 1).



Mapa 1. Polígono general del ANP Villa Allende
 Fuente: Conjunto de datos vectoriales topográficos a escala 1:50,000 (INEGI, 2010)

Villa Allende a través del Decreto Presidencial en el año de 1939 se declaró como un Área Natural Protegida con la categoría de Zona Protectora Forestal Vedada como resultado de los estudios llevados a cabo considerando su cobertura forestal como un factor importante de regulación del clima y del recurso hídrico. Actualmente esta ANP se encuentra en un proceso de recategorización, a través del cual se pretende incorporarla a la categoría de Área de Protección de Recursos Naturales.

Tomando en cuenta lo anterior, es pertinente mencionar que en la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA) publicada en el Diario Oficial de la Federación en 1988, en el artículo 53 se menciona que se consideran como Área de

Protección de Recursos Naturales (APRN) las reservas y zonas forestales, las zonas de protección de ríos, lagos, lagunas, manantiales y demás cuerpos considerados aguas nacionales, particularmente cuando éstos se destinen al abastecimiento de agua para el servicio de las poblaciones y, en seguimiento al mismo artículo, en su reforma de fecha del 13 de diciembre de 1996, se determina que solo estará sujeta a realizar actividades relacionadas con la preservación, protección y aprovechamiento sustentable de los recursos naturales en ellas comprendidos, así como con la investigación, recreación, turismo y educación ecológica (LGEEPA, 2016).

II.1.1 Descripción del componente natural

La información cartográfica utilizada para los diferentes componentes naturales tales como el clima, geología, litología, edafología y uso de suelo y vegetación se obtuvo de la página web oficial del INEGI. Para mayor detalle en la tabla 3 se muestra el conjunto de datos generales que se utilizaron para la descarga de cada uno de dichos componentes.

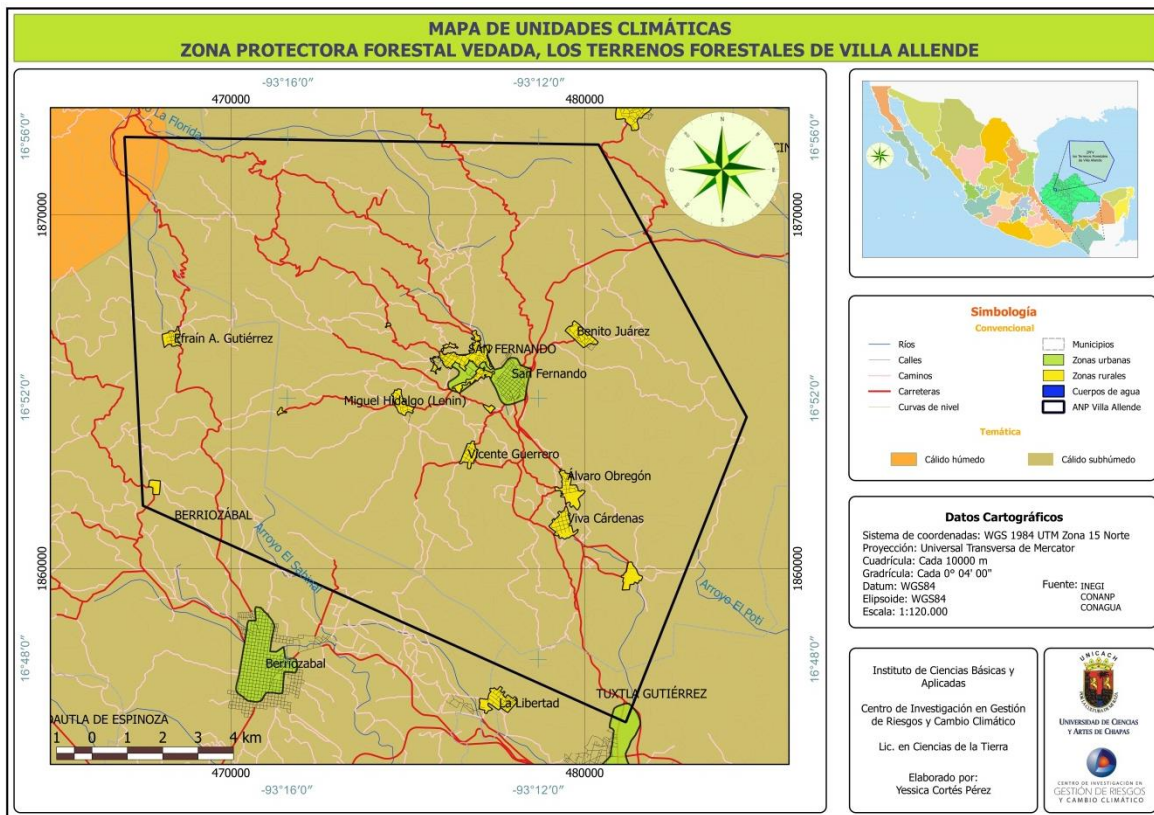
Tabla 3. Fuentes de consulta sobre los componentes naturales del ANP Villa Allende

Componente natural	Nombre de la capa	Escala	Fuente	Año
Clima	Datos vectoriales climatológicos	1:1,000,000	INEGI	2010
Geología	Datos vectoriales geológicos	1:1,000,000		
Edafología	Datos vectoriales edafológicos serie II	1:250,000		
Litología	Datos vectoriales geológicos	1:1,000,000		
Uso de suelo y vegetación	datos vectoriales de Uso de Suelo y Vegetación serie V	1:250,000		

A continuación se describen cada uno de los componentes y se muestran los mapas respectivos de la información.

II.1.1.1 Clima

Principalmente en el ANP Villa Allende los climas presentes son de tipo Cálido húmedo y Cálido subhúmedo. El clima Cálido húmedo representa el 1.01% mientras que el Cálido subhúmedo abarca el 98.99% cubriendo la mayor parte del área total del área de estudio (ver mapa 2).



Mapa 2. Unidades climáticas del ANP Villa Allende

Con respecto a las temperaturas ambientales que se han presentado en el área de trabajo durante los últimos 35 años en cada una de las estaciones del año, se muestra en la tabla 4 el promedio de cada una de éstas.

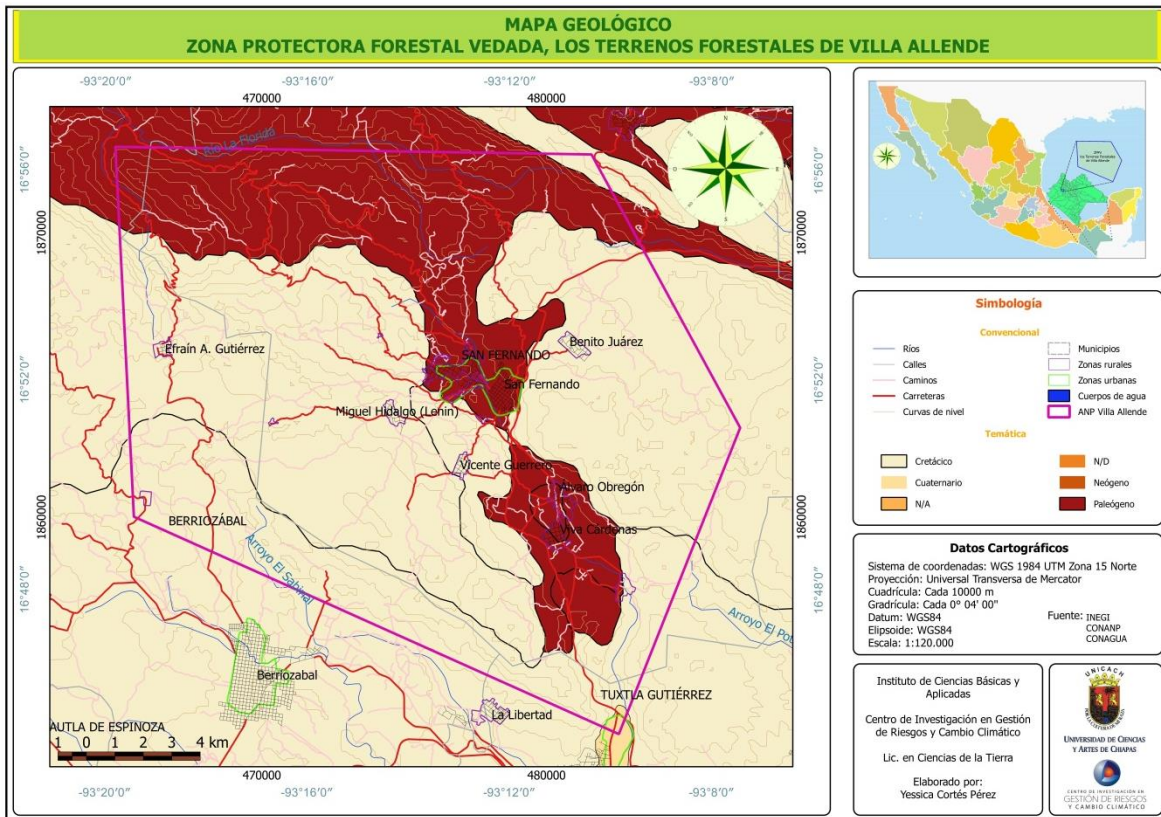
Tabla 4. Temperatura promedio histórica por cada una de las estaciones del año

Estación astronómica	Fecha de inicio	Temperatura media (°C)
Primavera	20 - 21 de marzo	24.10
Verano	21 - 22 de junio	23.32
Otoño	22 - 24 de septiembre	21.43
Invierno	21 - 22 de diciembre	20.74

Fuente: CONAGUA, 2016

II.1.1.2 Geología

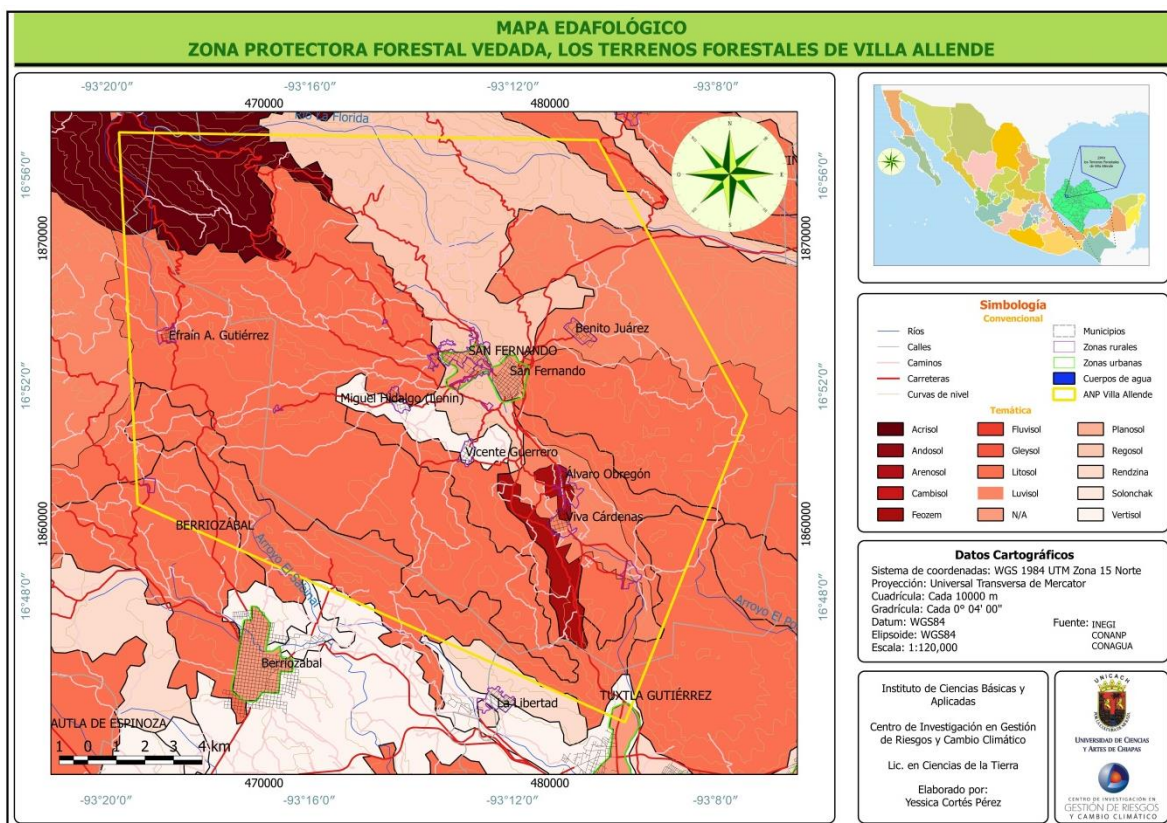
Los afloramientos litológicos presentes en el ANP Villa Allende son: Cretácico (63.69%), Paleógeno (23.03%), Cuaternario (7.52%) y Neógeno (0.12%) (ver mapa 3).



Mapa 3. Rasgos geológicos del ANP Villa Allende

II.1.1.3 Edafología

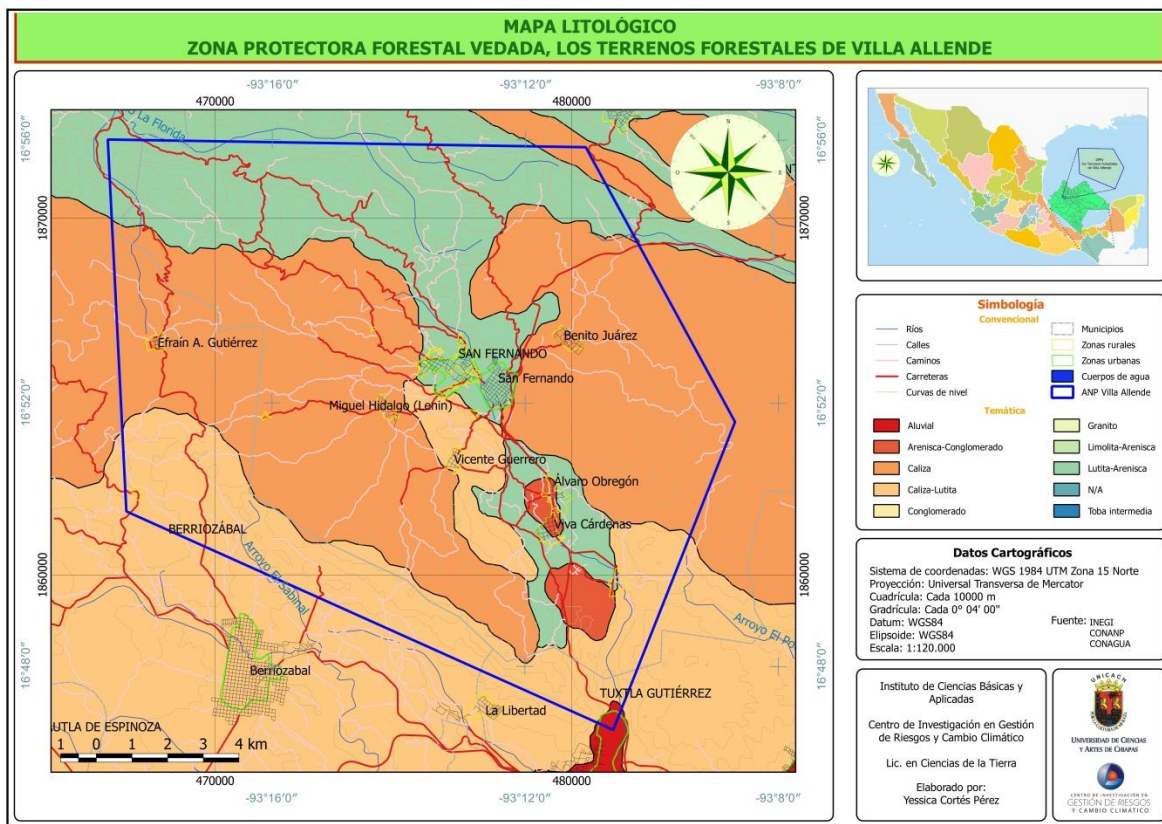
En la ZPFV Villa Allende predominan los siguientes tipos de suelos: Litosol que abarca el 59% de la superficie total del ANP, continuado por Regosol que cubre una superficie de 17%, Luvisol con 11%, Acrisol el 7%, Feozem y Vertisol con 2% (ver mapa 4).



Mapa 4. Edafología del ANP Villa Allende

II.1.1.4 Litología

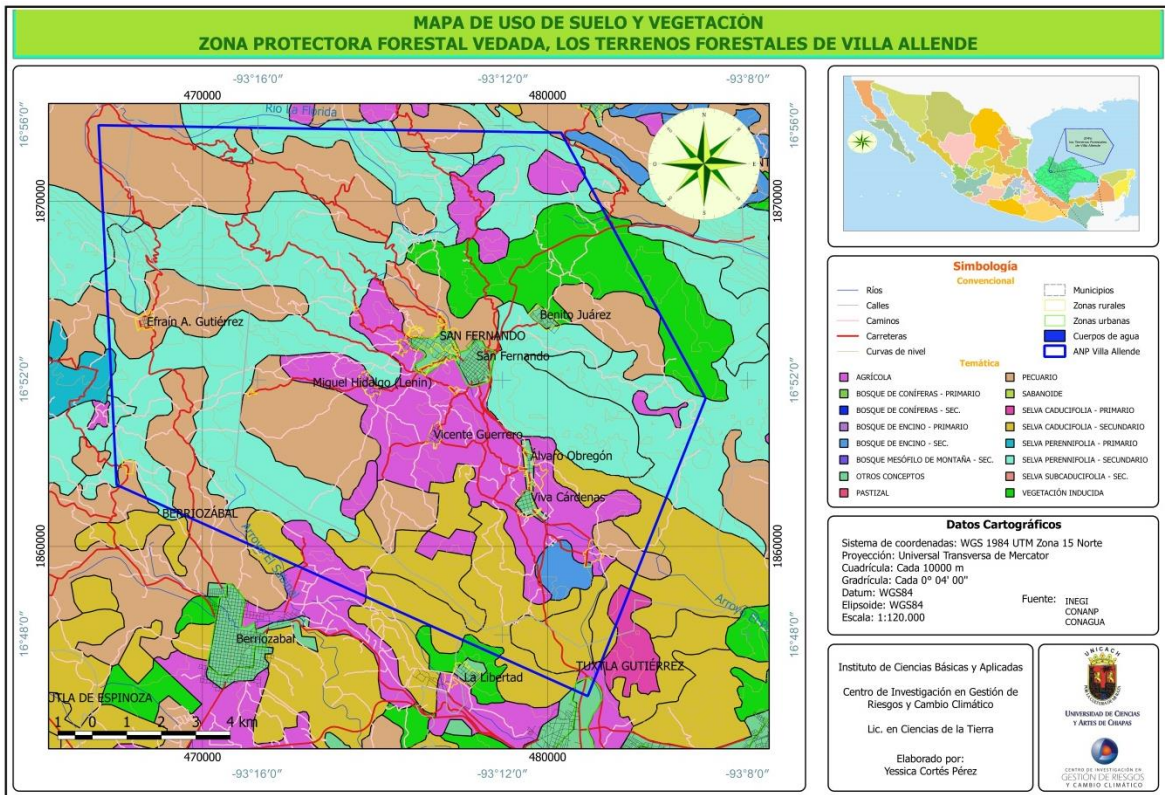
El ANP Villa Allende se compone con un 0.13% de roca Aluvial seguido por Arenisca con 1.87%, 20.37% de Caliza-Lutita y en cantidad similar Lutita-Arenisca con 27.24% y en su mayoría Caliza con 50.4% (ver mapa 5).



Mapa 5. Litología del ANP Villa Allende

II.1.1.5 Uso del suelo y vegetación

Gran parte del polígono de Villa Allende se caracteriza por selva perennifolia secundaria abarcando una superficie de 35.71%, pecuario 26.76%, agrícola 16.17%, selva caducifolia secundaria 12.38%, vegetación inducida 6.32%, bosque secundario 0.89%, selva caducifolia primaria 0.18% y en último lugar se encuentra la selva perennifolia primaria que tan solo cuenta con un 0.05% (ver mapa 6).



Mapa 6. Uso de Suelo y Vegetación del ANP Villa Allende

II.1.2 Descripción del componente social

II.1.2.1 Población

Dentro del polígono de Villa Allende se encuentran 112 localidades de las cuales 94 corresponden al municipio de San Fernando, incluyendo la cabecera municipal y 18 al municipio de Berriozábal. De acuerdo con el censo 2010 del INEGI, el ANP cuenta con una población total de 29,208 habitantes de los cuales el 3.27% (958 habitantes) pertenece a las localidades del municipio de Berriozábal y el resto (28,250 habitantes) a las localidades de San Fernando correspondientes al 96.72%, así mismo, según este censo ambos municipios se encuentran con un nivel alto de marginación a pesar que algunos centros de población de San Fernando se clasifican como semiurbanos (CONANP, 2016).

Con base a la información recabada del censo 2010 de INEGI, a continuación se muestran las localidades más grandes de ambos municipios (ver tabla 5):

Tabla 5. Localidades con mayor número de habitantes

Municipio	Localidad	No. habitantes
Berriozábal	Vistahermosa	237
	Efraín A. Gutiérrez	576
San Fernando	16 de Septiembre	1,020
	Álvaro Obregón	1,126
	Viva Cárdenas	1,431
	Benito Juárez	1,488
	Francisco I. Madero	1,993
	El Copalar	2,039
	El Progreso	2,704

II.1.2.2 Actividades socioeconómicas

Dentro de la poligonal del ANP Villa Allende existen actividades de uso y aprovechamiento tales como son actividades agropecuarias, las plantaciones de café, uso tradicional de la vegetación y la extracción de tierra de hoja y de material pétreo.

Con base en la información de la CONANP (2016), más del 55% de la población se dedica a actividades económicas primarias como la agricultura y la ganadería. Las principales actividades agrícolas están relacionadas con la producción de maíz, frijol, calabaza, café, chayote, caña y yuca. Para lo anterior se destinan 2,800 ha de plantaciones establecidas de café orgánico bajo sombra, donde participan más de 1,300 familias de pequeños productores.

Como parte de las actividades ganaderas se encuentran la crianza de ganado vacuno, porcino, ovinos y aves.

Otra de las actividades es el aprovechamiento de tierra de monte, principalmente por la demanda que se genera en los centros de poblaciones de Berriozábal, San Fernando y Tuxtla Gutiérrez, los cuales necesitan de este recurso para satisfacer sus requerimientos en viveros para su venta al público en general.

Así mismo, el aprovechamiento de la vegetación se lleva a cabo con fines medicinales, de ornato, comestible, ritual, cerca viva, combustible, colorante, pegamento, forrajeras, maderables, para construcción, uso doméstico y artesanales (juguetes, sombra, insecticida y melíferas).

Otra parte de la población se dedica a la explotación de bancos de materiales pétreos para aprovechar los estratos calizos formados en su mayor parte por carbonatos de calcio.

Este conjunto de actividades representa una forma de vida y de subsistencia de los habitantes locales (*Ibid*).

II.2 METODOLOGÍA

El presente estudio abordó, a través de la percepción remota y mediante el análisis de la imagen satelital, la estimación del aumento de la temperatura superficial presentada en los años 2000 y 2016. Esta estimación se realizó mediante ecuaciones que permiten conocer la variación de la temperatura superficial en función al cambio de uso de suelo y vegetación.

Dados los requerimientos de información para llevar a cabo el presente trabajo, se eligieron los dos años en estudio, además de que las imágenes de Landsat (7 y 8) contienen una mayor cantidad de datos provenientes de bandas adicionales en comparación con series

anteriores, que resultan de mucha utilidad para llevar a cabo un análisis más completo de los diferentes rasgos de la superficie terrestre.

Es importante mencionar que la metodología empleada para este trabajo se centró en el análisis de la variación de la temperatura superficial con relación a la presencia de vegetación, sin tomar en cuenta a las demás características físicas y estructurales de la superficie sujeta al estudio.

A continuación (ver figura 5), se muestran de manera gráfica los diferentes procesos que conllevaron al cálculo tanto del NDVI como de la TS y, en seguida, la descripción del procedimiento metodológico general para llevar a cabo el estudio de islas de calor en el ANP Villa Allende.

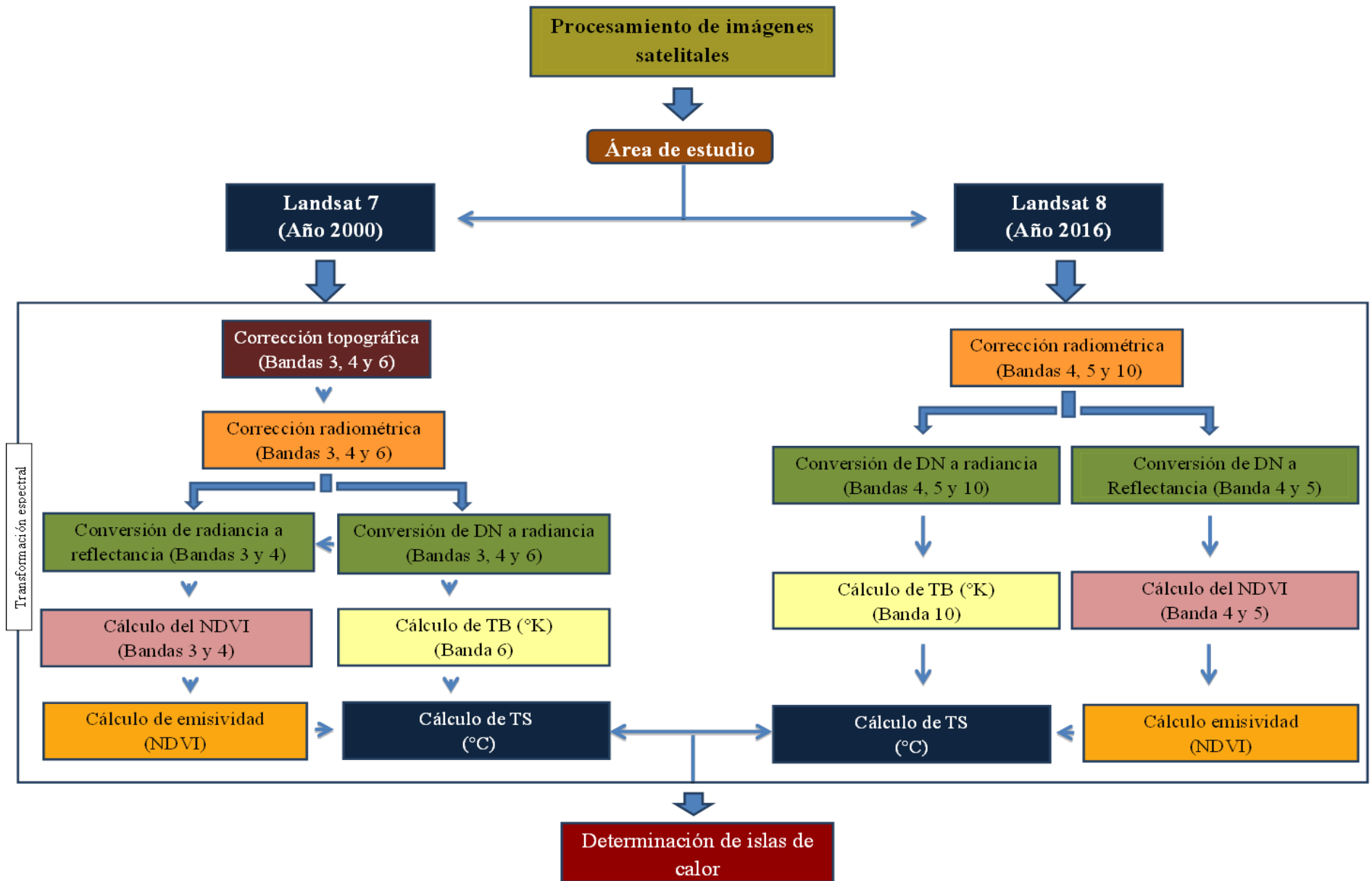


Figura 5. Mapa conceptual metodológico
Fuente: Imagen adaptada de Preciado, 2011

El procedimiento metodológico general es el siguiente:

1. Se descargó las imágenes de los satélites Landsat 7 y 8 del sensor ETM+ para la estimación de la variación de temperatura superficial para los años 2000 y 2016.
2. Mediante estos softwares ArcGis 10.3 y TerrSet, se realizó el pre-procesamiento de ajuste y corrección de las imágenes a través de la aplicación algorítmica, el cual permitió la reducción de interferencias atmosféricas ocasionadas por la nubosidad y otros factores que alteran la interpretación y el análisis espacial.

Cabe mencionar que el pre-procesamiento de las imágenes cambia en función del satélite que se esté utilizando, es decir, para imágenes Landsat 7 y Landsat 8 el proceso de corrección de imagen es diferente uno del otro.

Landsat 7 (Imagen del año 2000)

3. Cálculo de temperatura

3.1 Se calculó la temperatura superficial a partir de imágenes Landsat.

Convirtiendo los valores DN (Niveles Digitales) a radiancia espectral, en donde se aplicó la ecuación 1; los valores de cada parámetro se encontraron contenidos en el metadato de las imágenes.

$$L_{\lambda} = \left(\frac{LMAX-LMIN}{Qcalmax-Qcalmin} \right) (Qcal - Qcalmin) + LMIN \quad (1)$$

Donde:

L_λ = Radiancia [$W/(m^2sr\mu m)$]

Qcal = Imagen DN (Bandas espectrales)

LMAX = Radiancia máxima espectral escalada de acuerdo con el sensor
[$W/(m^2sr\mu m)$]

LMIN = Radiancia mínima espectral escalada de acuerdo con el sensor
[$W/(m^2sr\mu m)$]

Qcalmin = Mínimo valor de pixel de la imagen [DN]

Qcalmax = Máximo valor de pixel de la imagen [DN]

Los DN se refieren a los valores de los pixeles no calibrados que se encuentran en las imágenes satelitales y que representan la cantidad de energía radiante recibida por el sensor de la banda del satélite (Cogliati, 2011).

3.2 Cálculo de reflectancia. La reflectancia planetaria o también llamada aparente relaciona la radiancia medida por el sensor y la irradiancia solar incidente en la atmósfera (Chander y Markham, 2009).

El modelo empleado para el cálculo de la reflectancia aparente TOA (Top of Atmospher) genera un valor adimensional entre 0 y 1. Para el cálculo de ésta se utilizó la siguiente fórmula (2):

$$\rho_\lambda = \left(\frac{\pi * L_\lambda * d^2}{ESUN_\lambda * \cos\theta_s} \right) \quad (2)$$

Donde:

P_λ = Reflectancia aparente

π = Constante aproximada 3.1416

L_λ = Radiancia espectral [W/(m²sr μ m)]

d = Distancia del sol a la Tierra en unidades astronómicas, interpolada a partir del día Juliano de la toma de la fecha de la escena

$ESUN_\lambda$ = Promedio de irradiancia solar exoatmosférica para el sensor [W/(m²sr μ m)]

θ_s = Ángulo zenital solar

3.3 Cálculo de temperatura de brillo emitida por la superficie terrestre a través de la ecuación de Planck (3); la temperatura brillo es aquella energía emitida por los objetos o cuerpos presentes en la superficie que van en función de su longitud de onda dependiendo de la temperatura a la que estén expuestos (Olave *et al.*, 2008).

$$T_l = \frac{K_2}{\ln\left(\frac{K_1}{L} + 1\right)} \quad (3)$$

Donde:

T_l = Es la temperatura de brillo superficial [K]

L = Es el valor de radiancia [W/(m²sr μ m)]

K_1 = 666.09 es la constante de calibración 1 [W/(m²sr μ m)]

K_2 = 1282.71 es la constante de calibración 2 [W/(m²sr μ m)]

\ln = Logaritmo natural

3.4 Cálculo de temperatura superficial.

Para el cálculo de la temperatura superficial se utilizó la siguiente fórmula (4) (Van de Griend y Owe, 1993, citado por Martínez *et al.*, 2014):

$$Ts = \left[\frac{Tl^4}{Emisividad} \right]^{0.25} \quad (4)$$

Donde:

TS = Temperatura superficial [K]

TI = Temperatura de brillo superficial [K]

e = superficie de emisividad

Nota: el resultado obtenido está dado en grados Kelvin por lo tanto se requiere convertirlos a grados Celsius, ver ecuación 5.

$$Ts = \left[\frac{Tl^4}{Emisividad} \right]^{0.25} - 273.15 \quad (5)$$

Mediante la siguiente fórmula se obtuvo la superficie de emisividad correspondiente del área, tomando en cuenta el valor promedio de emisividad de vegetación (0.98), como corrección de emisión espectral y 0.93 como valor de la emisividad del suelo (Lillesand y Kiefer, 1996, citado por Martínez *et al.*, 2014), ver ecuación (6).

$$Emisividad = Fv (0.98) + (1 - Fv)(0.93) \quad (6)$$

Fv= Factor o fracción de vegetación (ecuación 7)

0.98 = Emisividad promedio de la vegetación

0.93 = Emisividad promedio del suelo

$$Fv = N^2 \quad (7)$$

N = Normalización del NDVI (ver ecuación 8)

$$N = \left(\frac{NDVI - NDVI_{Min}}{NDVI_{Max} - NDVI_{Min}} \right) \quad (8)$$

3.4 Una vez obtenidos los valores, se realizó una clasificación de las imágenes de acuerdo con la uniformidad en la temperatura, asociada a la fecha de toma y de los rangos obtenidos del cálculo de temperatura.

4. Cálculo de Índice Normalizado Diferencial de la Vegetación (por sus siglas en inglés NDVI) de las imágenes Landsat. Este se realizó con la finalidad de realzar las áreas con mayor vigor vegetal y para reducir el efecto de las sombras originadas por el relieve.

Este cálculo permite conocer la relación que existe entre absorción y emisión de energía presentada en la cubierta vegetal (Meneses, 2011/2), ver ecuación (9).

$$NDVI = \frac{BIRC - BR}{BIRC + BR} \quad (9)$$

Donde:

BIRC= Banda del infrarrojo cercano (Banda 4)

BR= Banda del visible rojo (Banda 3)

Landsat 8 (Imagen del año 2016)

En comparación con las imágenes Landsat 7, las imágenes de Landsat 8 se encuentran corregidas radiométrica y geoméricamente debido a los sensores OLI y TIRS (Operational Land Imagen y Thermal Infrared Sensor), por lo tanto, solo se convirtieron los niveles digitales (DN) a reflectancia en el techo de la atmósfera (TOA) con corrección por ángulo solar (bandas 1 a 9), o bien, conversión a radiancia en el techo de la atmósfera (bandas 1 a 11) (Ariza, 2013).

5. Conversión a radiancia en el techo de la atmósfera (TOA). A través de la siguiente ecuación (10) se convirtieron los DN niveles digitales a valores de radiancia en el techo de la atmósfera.

$$L_{\lambda} = M_L * Q_{cal} + A_L \quad (10)$$

Donde:

L_{λ} = Es el valor de radiancia espectral en el techo de la atmósfera (TOA) medida en valores de (Watts/m²*srad * μ m)

M_L = Es el factor multiplicativo de escalado específico obtenido del metadato de la imagen (RADIANCE_MULT_BAND_x, donde x es el número de la banda)

A_L = Es el factor aditivo de escalado específico obtenido del metadato de la imagen (RADIANCE_ADD_BAND_x, donde x es el número de la banda)

Q_{cal} = Producto estándar cuantificado y calibrado por valores de pixel (DN). Este se refiere a la banda de la imagen

6. Conversión a reflectancia en el techo de la atmósfera. La reflectancia captada por el sensor está condicionada por el comportamiento de la atmósfera por el cual, es necesario realizar una corrección por ángulo solar para obtener datos más confiables, mediante la siguiente ecuación (11) se convirtieron los ND niveles digitales a valores de reflectancia incluyendo la corrección por ángulo solar (*Ibid*). Es importante mencionar que este cálculo solo se realiza para las bandas 4 y 5.

$$P\lambda' = \frac{(M_P * Q_{cal} + A_P)}{\sin(\theta_{se})} \quad (11)$$

Donde:

$P\lambda'$ = Es el valor de reflectancia planetario en el techo de la atmósfera TOA, con corrección por ángulo solar

M_P = Es el factor multiplicativo de escalado específico obtenido del metadato de la imagen (REFLECTANCE_MULT_BAND_x, donde x es el número de la banda)

A_P = Es el factor aditivo de escalado específico obtenido del metadato de la imagen (REFLECTANCE_ADD_BAND_x, donde x es el número de la banda)

Q_{cal} = Producto estándar cuantificado y calibrado por valores de pixel (DN). Este se refiere a la banda de la imagen

θ_{se} = Es el ángulo de elevación solar. El ángulo de elevación solar del centro de la escena es provisto en el metadato de la imagen (SUN_ELEVATION).

7. Cálculo del Índice Normalizado Diferencial de la Vegetación (NDVI, por sus siglas en inglés) de las imágenes Landsat. Este se realiza con la finalidad de realzar las áreas con mayor vigor vegetal y para reducir el efecto de las sombras originadas por el relieve.

Este cálculo permite conocer la relación que existe entre absorción y emisión de energía presentada en la cubierta vegetal (Meneses, 2011/2), ver ecuación (12).

$$NDVI = \frac{BIRC - BR}{BIRC + BR} \quad (12)$$

Donde:

BIRC= Banda del infrarrojo cercano (Banda 5)

BR= Banda del visible rojo (Banda 4)

Nota: en comparación con las imágenes Landsat 7 las bandas que se utilizaron para el cálculo del NDVI en esta ecuación son distintas debido a los dos nuevos sensores que contiene el satélite Landsat 8.

8. Cálculo de temperatura de brillo emitida por la superficie terrestre a través de la ecuación de Planck (13); la temperatura brillo es aquella energía emitida por los objetos o cuerpos presentes en la superficie que van en función de su longitud de onda dependiendo de la temperatura a la que estén expuestos (Olave *et al.*, 2008).

$$T_l = \frac{K_2}{Ln\left(\frac{K_1}{L} + 1\right)} \quad (13)$$

Donde:

T_1 = Es la temperatura de brillo superficial [K]

L = Es el valor de radiancia [$W/(m^2sr\mu m)$]

K_1 = Es la constante de calibración 1 [$W/(m^2sr\mu m)$]. Valor contenido en el metadato de la imagen ($K1_CONSTANT_BAND_x$, donde x es el número de la banda, 10 o 11)

K_2 = Es la constante de calibración 2 [$W/(m^2sr\mu m)$]. Valor contenido en el metadato de la imagen ($K2_CONSTANT_BAND_x$, donde x es el número de la banda, 10 o 11)

Ln = Logaritmo natural

9. Cálculo de temperatura superficial. Para el cálculo de la temperatura superficial se utilizó la siguiente fórmula (14).

$$T_s = \frac{T_l}{1} + W * \left(\frac{T_l}{P}\right) * Ln(e) \quad (14)$$

Donde:

T_s = Temperatura superficial [°K]

T_1 = Es la temperatura de brillo superficial [°K]

W = Longitud de onda de radiación emitida (banda 10 u 11)

P = 14380 es una constante extraída de la siguiente fórmula: $h*c/s$ ($1.438*10^{-34}Js$)

h = Constante de Planck

s = Constante de Boltzmann

c = Velocity of light

e = Superficie de emisividad

Mediante la siguiente fórmula se obtuvo la superficie de emisividad correspondiente del área (Sobrino *et al.*, 2004) ver ecuación (15).

$$e = 0.004 * Pv + 0.986 \quad (15)$$

Donde:

e = Superficie de emisividad

0.004 = Desviación estándar de la emisividad de vegetación

0.986 = Emisividad del suelo

Pv = Proporción de la vegetación (ecuación 16)

$$Pv = \left(\frac{NDVI - NDVI_{MIN}}{NDVI_{MAX} - NDVI_{MIN}} \right)^2 \quad (16)$$

Donde:

NDVI = Índice Normalizado Diferencial de la Vegetación

NDVI_{MIN} = Valor mínimo del Índice Normalizado Diferencial de la Vegetación

NDVI_{MAX} = Valor máximo del Índice Normalizado Diferencial de la Vegetación

10. Una vez obtenidos los valores se realizó una clasificación de las imágenes de acuerdo con la uniformidad en la temperatura, asociada a la fecha de toma y de los rangos obtenidos del cálculo de temperatura.
11. Se extrajo el conjunto de los valores más altos de la TS con los cuales se infiere la presencia de islas de calor dentro del área de estudio.

III. RESULTADOS

En seguida se muestran los resultados obtenidos del pre-procesamiento de las bandas utilizadas para la determinación de islas de calor, tanto para Landsat 7 como para Landsat 8.

Con respecto a Landsat 7 de marzo del año 2000 se llevó a cabo lo siguiente:

a) Corrección topográfica

Se realizó la corrección topográfica de las bandas espectrales 3, 4 y 6; este pre-proceso permitió la eliminación o reducción de sombras causadas por las geformas del terreno. A continuación se muestran las figuras correspondientes de la corrección topográfica de cada banda tratada, así mismo de la imagen previa de dicha corrección (ver figuras 6, 7 y 8).

Como se puede apreciar en la figura 6 b los valores correspondientes de la banda 3 con corrección topográfica van de 21.4705 a 212.47, presentándose por un lado, los valores más altos en las áreas centro, sur y sureste del polígono de estudio y, por otro lado, los valores más bajos de manera más evidente en las porciones este y noreste del polígono.

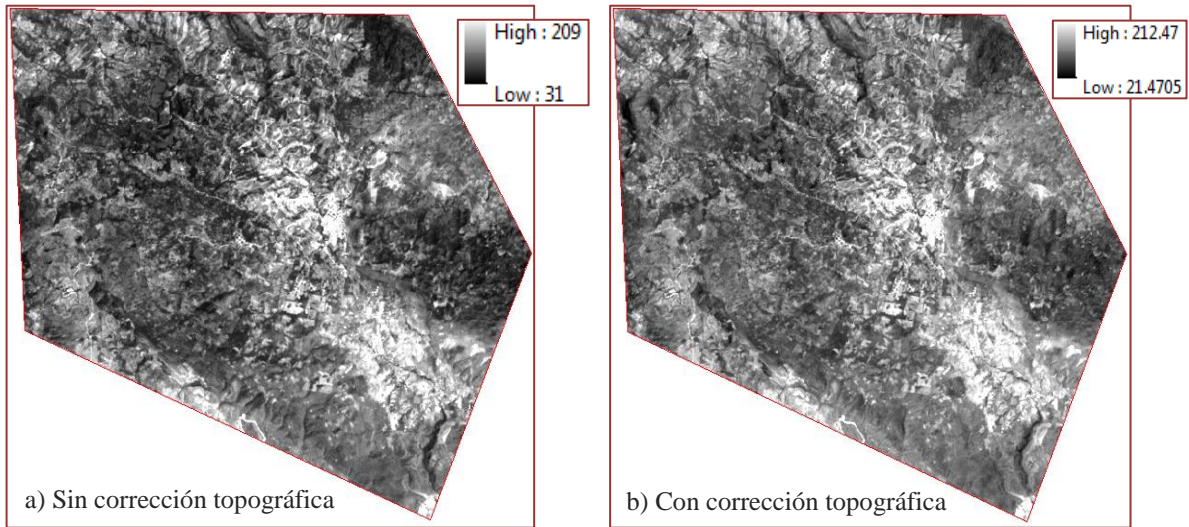


Figura 6. Corrección topográfica de la banda 3 de Landsat 7

Cabe mencionar que los valores más bajos corresponden a las áreas con mayor corrección topográfica por representar superficies con más sombra debido a la irregularidad de su relieve y al ángulo de incidencia solar. Por el contrario, las áreas con valores más altos corresponden a aquellos sitios con menor corrección topográfica debido a que son superficies con más iluminación solar dado a que el terreno es más homogéneo.

En la figura 7 se presentan los valores obtenidos para la banda 4 de Landsat 7.

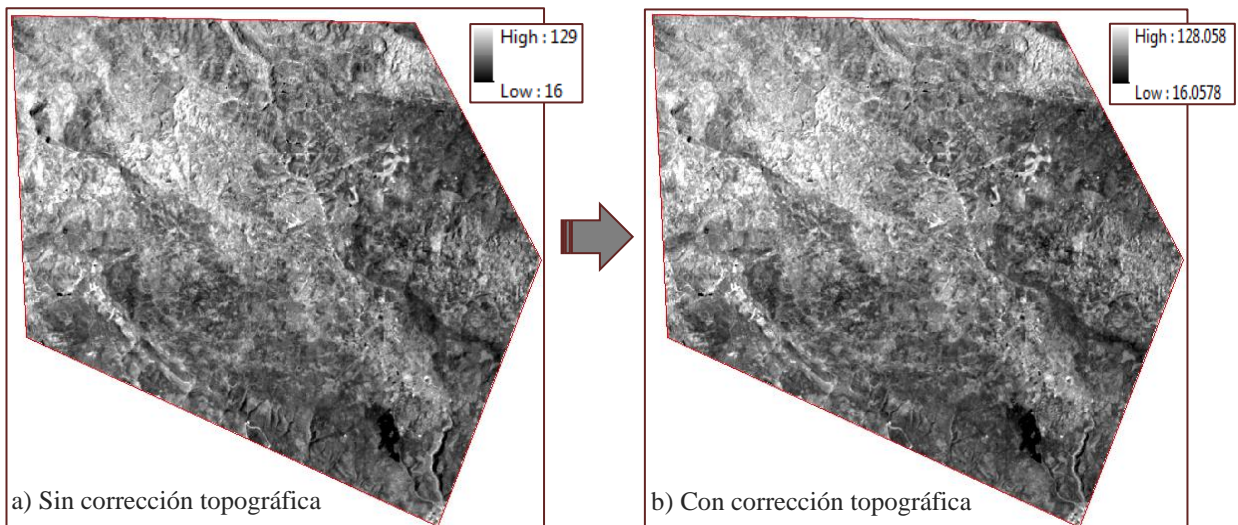


Figura 7. Corrección topográfica de la banda 4 de Landsat 7

La banda 4 con corrección topográfica (figura 7 b) presenta valores que van de 16.0578 hasta 128.058, los valores más bajos se encuentran ubicados en una porción del lado sur de la ZPFV.

Con respecto a los valores más altos, se puede decir que corresponden a aquellas áreas que presentan una mayor heterogeneidad de geformas las cuales se ubican en la porción noroeste en color blanco dentro del polígono de estudio.

Debido a las propiedades que presenta esta banda, la corrección topográfica no realizó cambios sustanciales en los valores obtenidos en el área de trabajo, tal y como se muestra en la figura anterior.

Así mismo al igual que las bandas anteriores en la figura 8 se visualiza el resultado obtenido de la corrección topográfica para la banda térmica (banda 6).

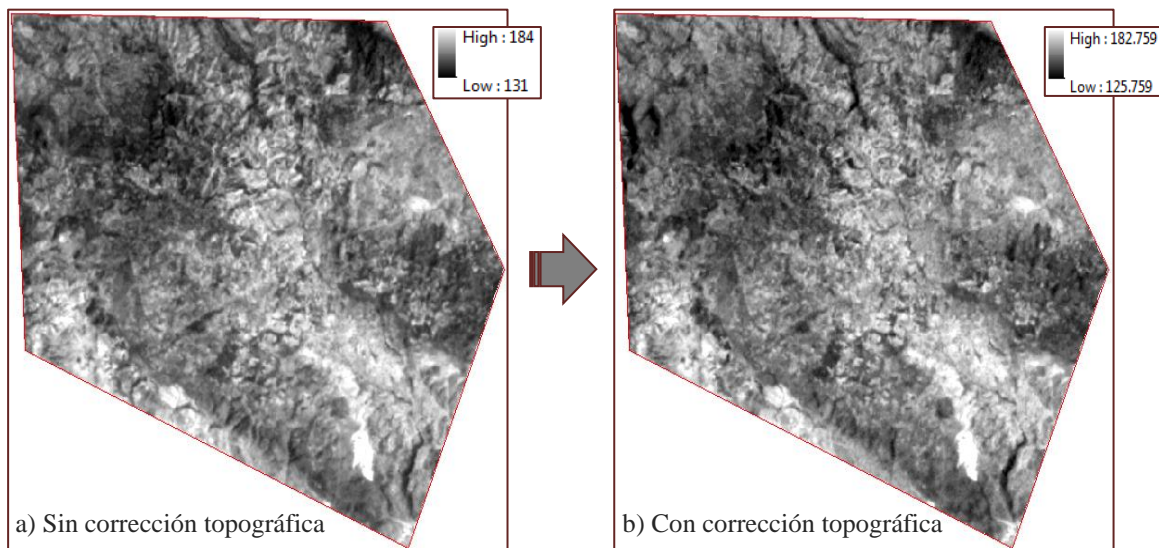


Figura 8. Corrección topográfica de la banda 6 de Landsat 7

Los valores arrojados para la banda térmica (figura 8 b) van de 125.759 a 182.759 donde el valor más alto se ubica en diferentes porciones del lado norte del área de estudio.

Los valores resultantes en la corrección topográfica de cada banda corresponden a los DN (Niveles Digitales) contenidos después de haber realizado el tratamiento de la imagen, proceso que permitió la homogeneización de los DN con la finalidad de “aplanar” la superficie.

En la siguiente figura (9) se muestra una imagen multiempectral donde se aprecia con mayor claridad aquellas zonas que presentaron mayor corrección topográfica puesto que es el compilado de las tres bandas expuestas individualmente (bandas 3, 4 y 6).

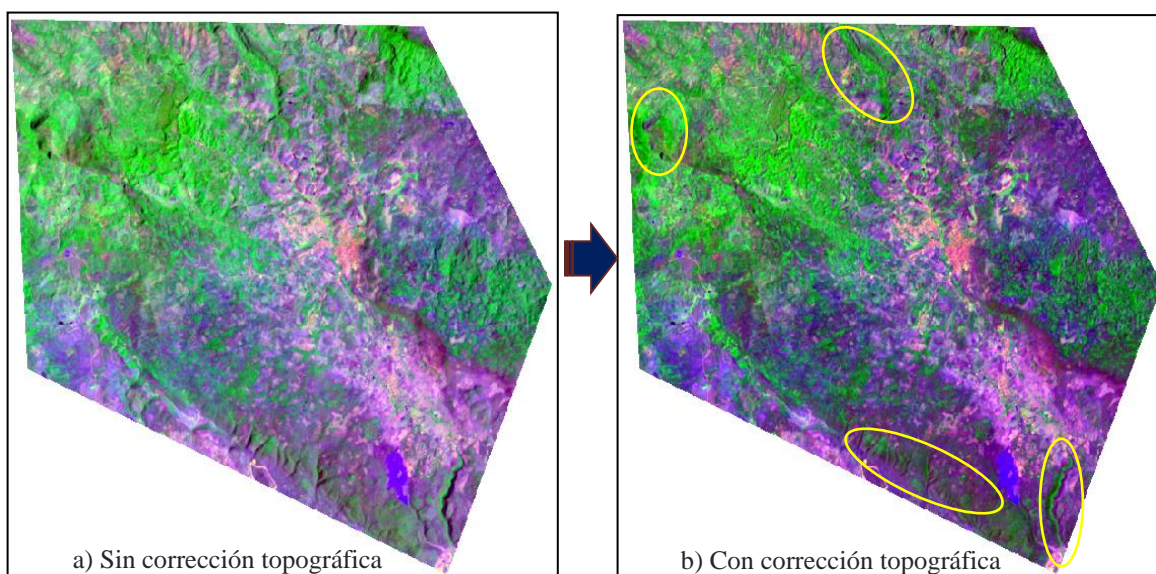


Figura 9. Compilado de bandas Landsat7

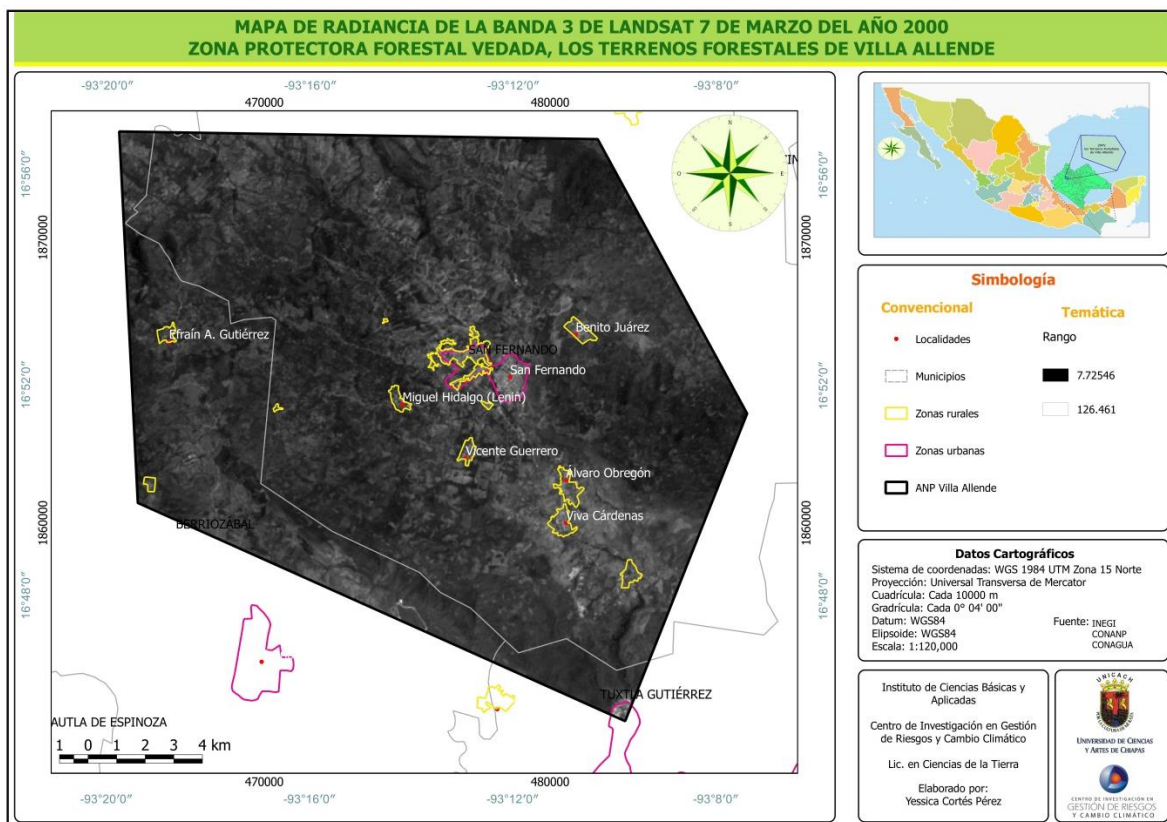
Como se puede ver en la imagen anterior (figura 9 b) los colores que tienden de morado a rosa representan áreas perturbadas en donde existe influencia directa de actividades antrópicas, las áreas con diferentes intensidades de rosa son los centros de población y las áreas verdes se presentan en zonas donde la vegetación se encuentra más preservada.

Los óvalos de color amarillo presentados en la figura 9 b señalan algunas de las zonas más evidentes donde la corrección topográfica tuvo más efecto, es decir, estas áreas ya no presentan tantas sobras por el relieve sino que la superficie se ve más plana evitando las áreas con sombra y en su defecto disminuyendo las mismas.

Los resultados anteriormente presentados permitieron dar paso a otra de las correcciones más importantes durante el pre-procesamiento de las imágenes de satélite.

b) Corrección radiométrica

Se calculó la radiancia para las mismas bandas las cuales pueden visualizarse en los siguientes resultados (ver mapas 7, 8 y 9).



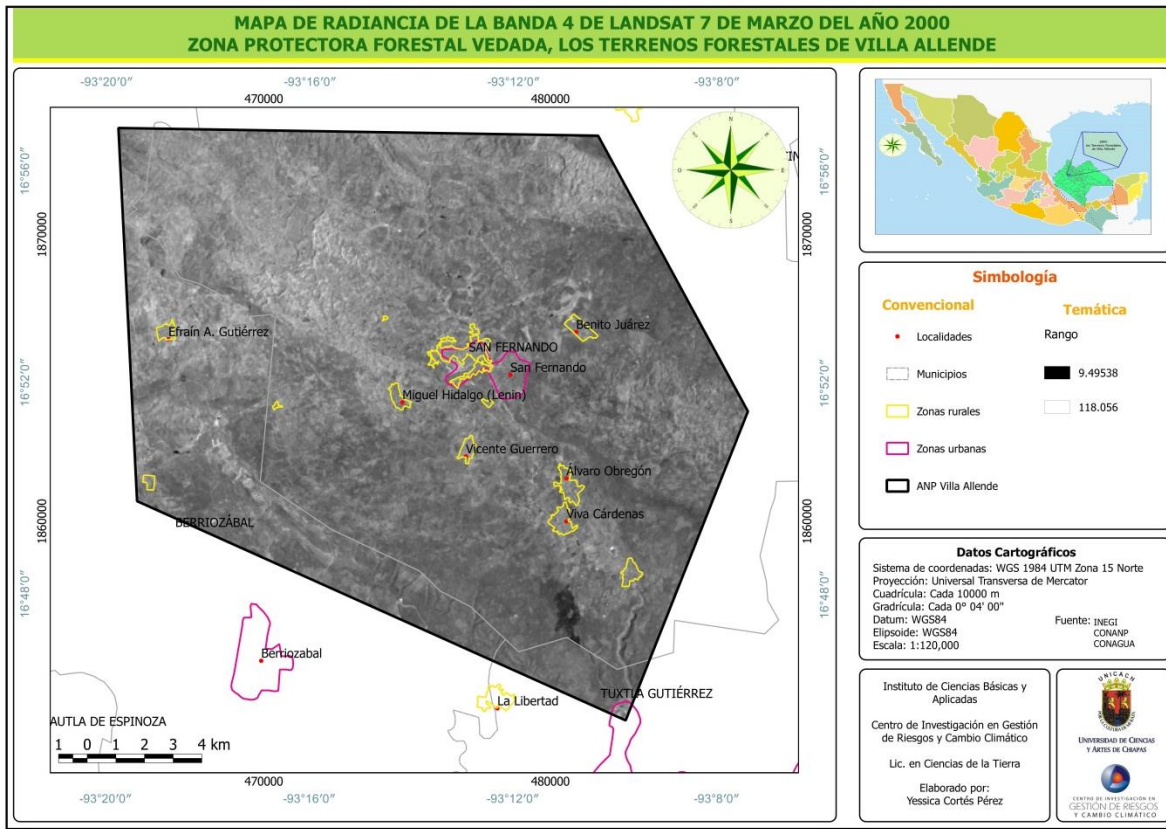
Mapa 7. Radiancia de la banda 3 de Landsat 7

En una escala cromática de negro a blanco se visualiza el resultado obtenido para la banda 3 de Landsat 7, el valor más alto corresponde al color blanco igual a 126.461 mientras que el más bajo en color negro representa el valor de $7.72546 \text{ Watts/m}^2 \cdot \text{srad} \cdot \mu\text{m}$. Estos valores se refieren a la energía radiada por unidad de área con base en el ángulo de incidencia solar.

De acuerdo con los resultados, los valores altos se asocian a áreas pobladas o con vegetación escasa o nula y, por el contrario, los valores bajos están relacionados con áreas que presentan vegetación.

Como se puede ver en el mapa 7 los valores más altos se ubican en la zona centro del polígono de estudio y los más bajos en las porciones este, oeste y norte de la ZPFV.

Para la banda 4 se puede observar la espacialidad de los valores de radiancia a través del siguiente mapa (ver mapa 8).

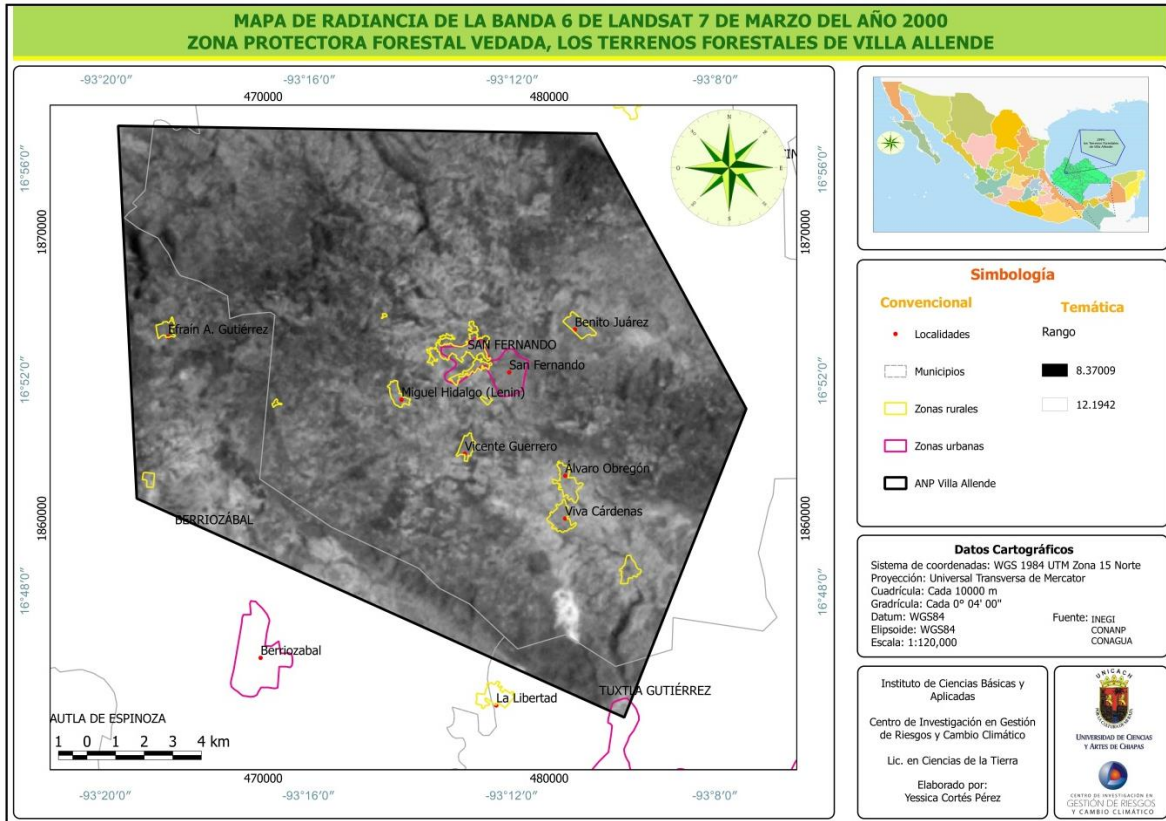


Mapa 8. Radiancia de la banda 4 de Landsat 7

En el mapa 8 se visualiza la espacialidad de los valores de radiancia desde el más bajo hasta el más alto (9.49538 a 118.056 $\text{Watts/m}^2 \cdot \text{srad} \cdot \mu\text{m}$) dentro del ANP correspondientes a los resultados obtenidos para la banda 4 de Landsat 7.

Se puede ver con mayor claridad una zona con los valores más bajos de radiancia en color negro en la porción sur del área de estudio y con valores más altos en la zona norte.

A continuación se muestra a través del mapa 9 el resultado obtenido de la conversión de niveles digitales a radiancia de la banda térmica.

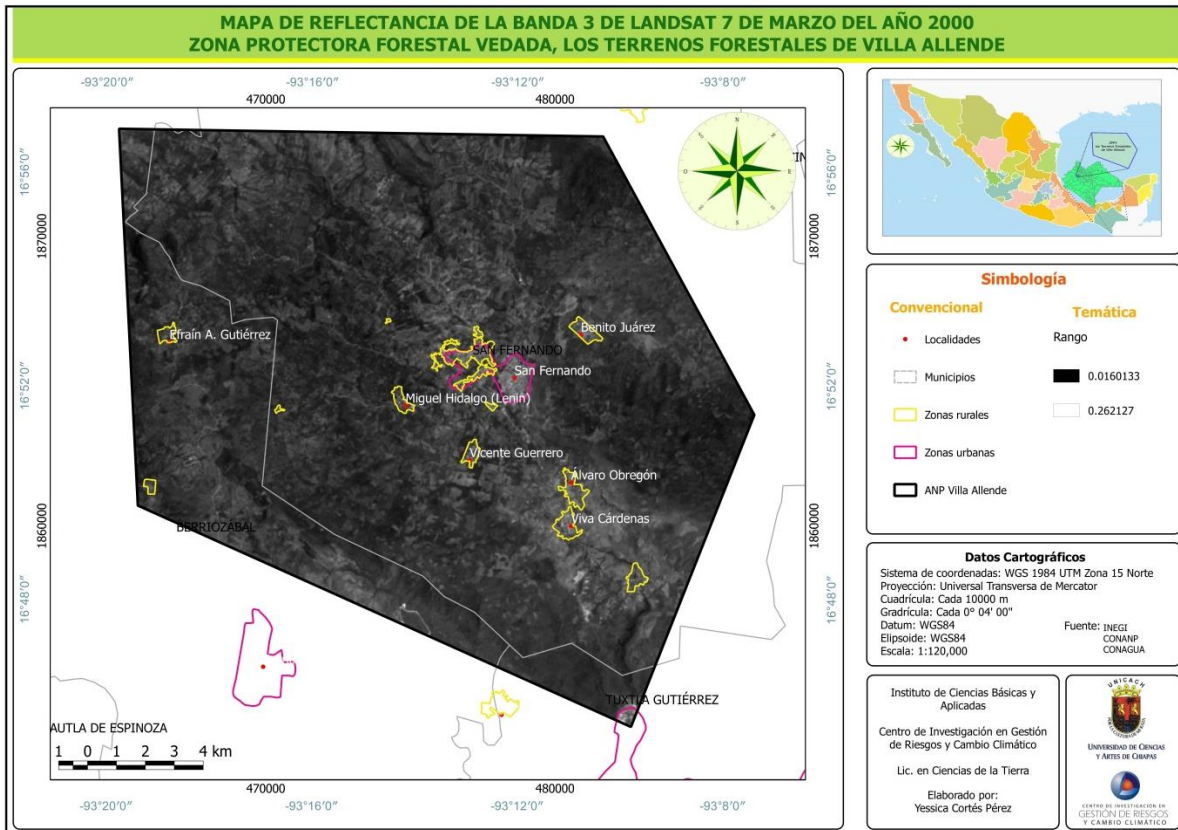


Mapa 9. Radiancia de la banda 6 de Landsat 7

Para la banda térmica de Landsat 7 los valores de radiancia resultantes van de 8.37009 a 12.1942 en donde el más alto se ubica en el lado sur de la ZPFV en color blanco y los más bajos en la zona norte del polígono representados en color negro.

En los mapas anteriormente visualizados (mapas 7, 8 y 9) se muestran los resultados obtenidos de la corrección radiométrica mediante la cual se convirtieron los valores en DN de la imagen de satélite a valores de radiancia obtenidos en $W/(m^2sr\mu m)$. Estos resultados indican la cantidad de energía radiante reflejada por la superficie.

A continuación en los mapas 10 y 11 se muestran los resultados obtenidos de la conversión de radiancia a reflectancia aplicada solo para las bandas 3 y 4 de Landsat 7.

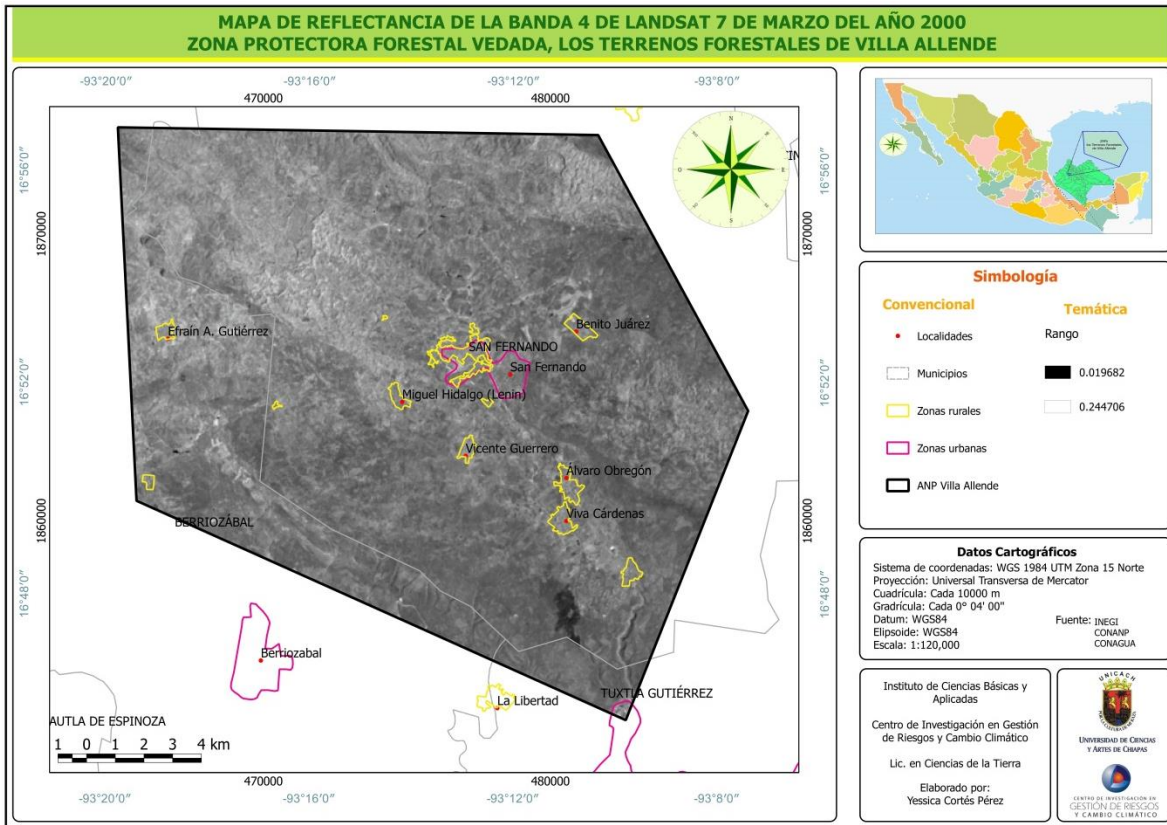


Mapa 10. Reflectancia de la banda 3 de Landsat 7

Vale la pena recordar que la reflectancia es la parte de la irradiancia solar que alcanza a la superficie terrestre que se refleja de nuevo a la atmósfera, por lo tanto los rangos correspondientes en el resultado de cada banda indican el índice entre la radiación que parte del suelo y la procedente del sol medida en la superficie del pixel.

El resultado obtenido para la banda 3 corresponden al rango de 0.0160133 a 0.262127 en donde las zonas urbanas son las que muestran mayor reflectancia.

Para el caso de la banda 4 se puede visualizar a través del mapa 11.



Mapa 11. Reflectancia de la banda 4 de Landsat 7

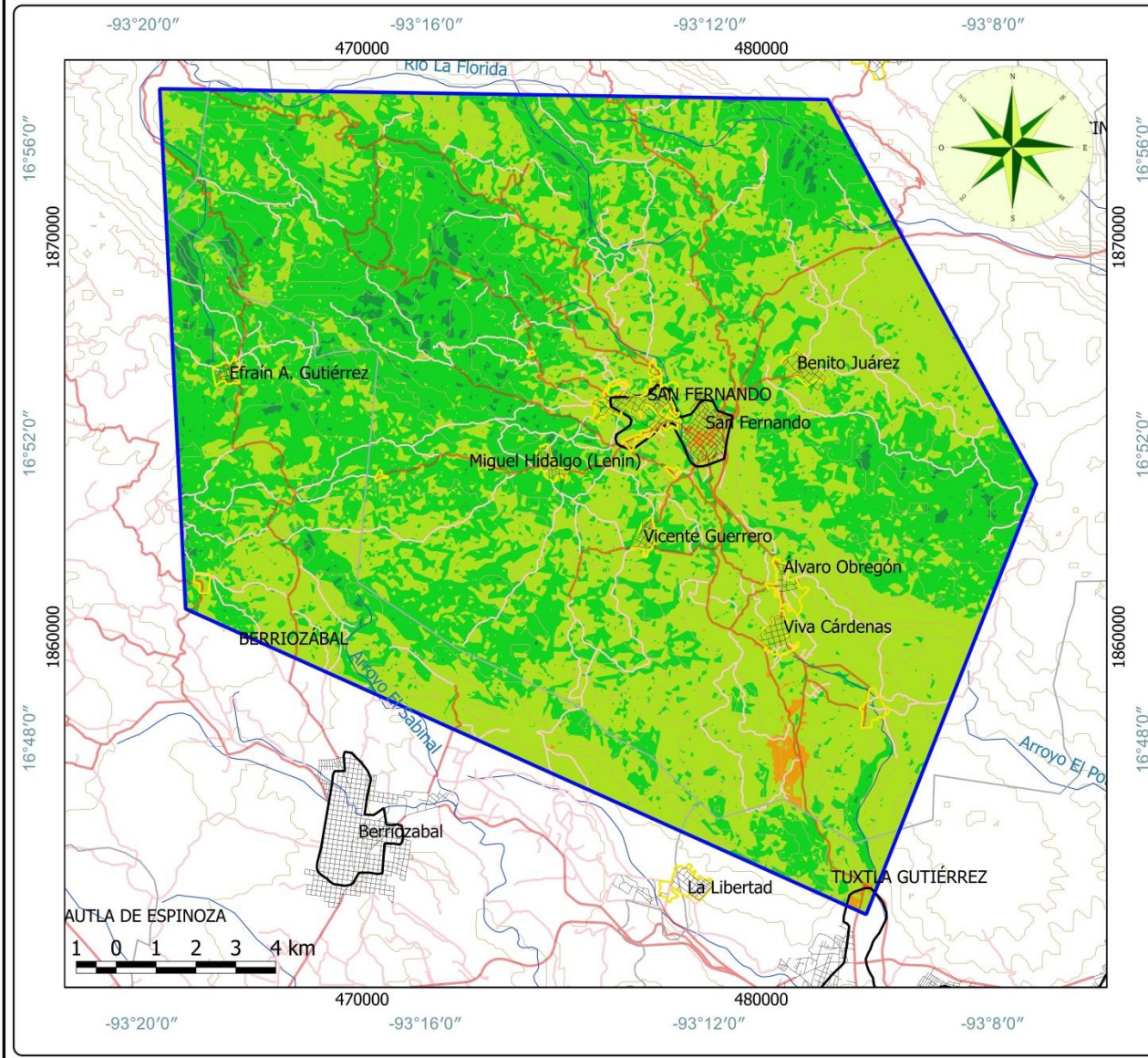
Para esta última banda los rangos van de 0.019682 a 0.244706, donde la distribución de los valores más altos corresponden a áreas de poca influencia antropogénica y, por el contrario, las áreas con menor reflectancia representan a aquellas que tienen una relación directa con infraestructura urbana como se puede observar con mayor claridad en la porción norte de la ZPFV.

Uno de los resultados más importantes en este trabajo de investigación corresponde al cálculo del NDVI, cuyos valores se muestran a continuación.

c) Cálculo del NDVI

Una vez que se han calculado los valores de reflectancia se procedió al cálculo del NDVI. Para la obtención de este parámetro, al igual que la reflectancia, solo se utilizaron las bandas 3 y 4 de Landsat 7. A continuación se presenta el resultado cartográfico obtenido del cálculo del NDVI de marzo del año 2000 (ver mapa 12), el cual se describe detalladamente más adelante.

**MAPA DE ÍNDICE NORMALIZADO DIFERENCIAL DE LA VEGETACIÓN DE MARZO DEL AÑO 2000
ZONA PROTECTORA FORESTAL VEDADA, LOS TERRENOS FORESTALES DE VILLA ALLENDE**



Simbología

Convencional

- Ríos
- Calles
- Caminos
- Carreteras
- Curvas de nivel
- Municipios
- Zonas rurales
- Zonas urbanas
- Cuerpos de agua
- ANP Villa Allende

Temática

Rango

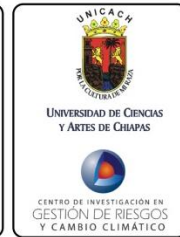
- -0.35 a -0.30
- -0.30 a 0
- 0 a 0.30
- 0.30 a 0.60
- 0.60 a 0.90

Datos Cartográficos

Sistema de coordenadas: WGS 1984 UTM Zona 15 Norte
 Proyección: Universal Transversa de Mercator
 Cuadrícula: Cada 10000 m
 Gradrícula: Cada 0° 04' 00"
 Datum: WGS84
 Elipsoide: WGS84
 Escala: 1:120,000

Fuente: INEGI
 CONANP
 CONAGUA

Instituto de Ciencias Básicas y Aplicadas
 Centro de Investigación en Gestión de Riesgos y Cambio Climático
 Lic. en Ciencias de la Tierra
 Elaborado por:
 Yessica Cortés Pérez



Mapa 12. NDVI de marzo del año 2000

De acuerdo con el mapa anterior se puede visualizar la distribución espacial del cálculo del NDVI. En este sentido el resultado obtenido para marzo del año 2000 presenta los siguientes rangos y el área que ocupa cada uno de ellos (ver tabla 6):

Tabla 6. Resultados del NDVI de marzo del año 2000

Rango de NDVI	Superficie ocupada (ha)
-0.35 a -0.30	0.09
-0.30 a 0	119.95
0 a 0.30	10,559.27
0.30 a 0.60	9,260.56
0.60 a 0.90	363.53

Como se puede apreciar en la tabla anterior el índice de vegetación con mayor área cubierta dentro del ANP es el rango que corresponde de 0 a 0.30 cubriendo el 50.27% de la misma, ubicado principalmente en los centros de población, vías de comunicación y con mayor realce en la carretera que comunica la ciudad capital Tuxtla Gutiérrez con San Fernando. Con base en la carta de vegetación y uso de suelo del INEGI (2010), dentro de este rango se encuentran porciones de vegetación inducida, áreas agrícolas y pecuarias, además de zonas habitadas y/o intervenidas antropicamente.

El rango de NDVI que oscila entre 0.30 a 0.60, cubre una superficie de 47.42% de la ZPFV, éste rango se presenta claramente en las zonas norte, noroeste, noreste, este y en menor proporción en el lado sur, que de acuerdo con el tipo de vegetación según información del INEGI (2010) corresponde a áreas de selva perennifolia secundaria, selva caducifolia secundaria y áreas pecuarias.

También se observa un NDVI de rango 0.60 a 0.90 con una superficie cubierta de 363.53 ha lo que equivale al 1.73% del área total del polígono, este rango se ubica en zonas

más puntuales que corresponden a las pequeñas montañas en donde aun no se presentan centros de población.

Con un área de 119.94 ha se encuentra el rango de NDVI de -0.30 a 0 indicados de color naranja en el mapa 12, donde dicho rango se presenta claramente en un tramo de la carretera de Tuxtla Gutiérrez - San Fernando, donde se localiza la subestación eléctrica El Sabino de la Comisión Federal de Electricidad (CFE) y en el centro de la cabecera municipal de éste último.

Finalmente, el rango que oscila entre -0.35 a -0.30 no logra visualizarse en el mapa anteriormente mencionado puesto que cubre un área muy pequeña igual a 0.09 ha ubicada en el extremo sureste del polígono.

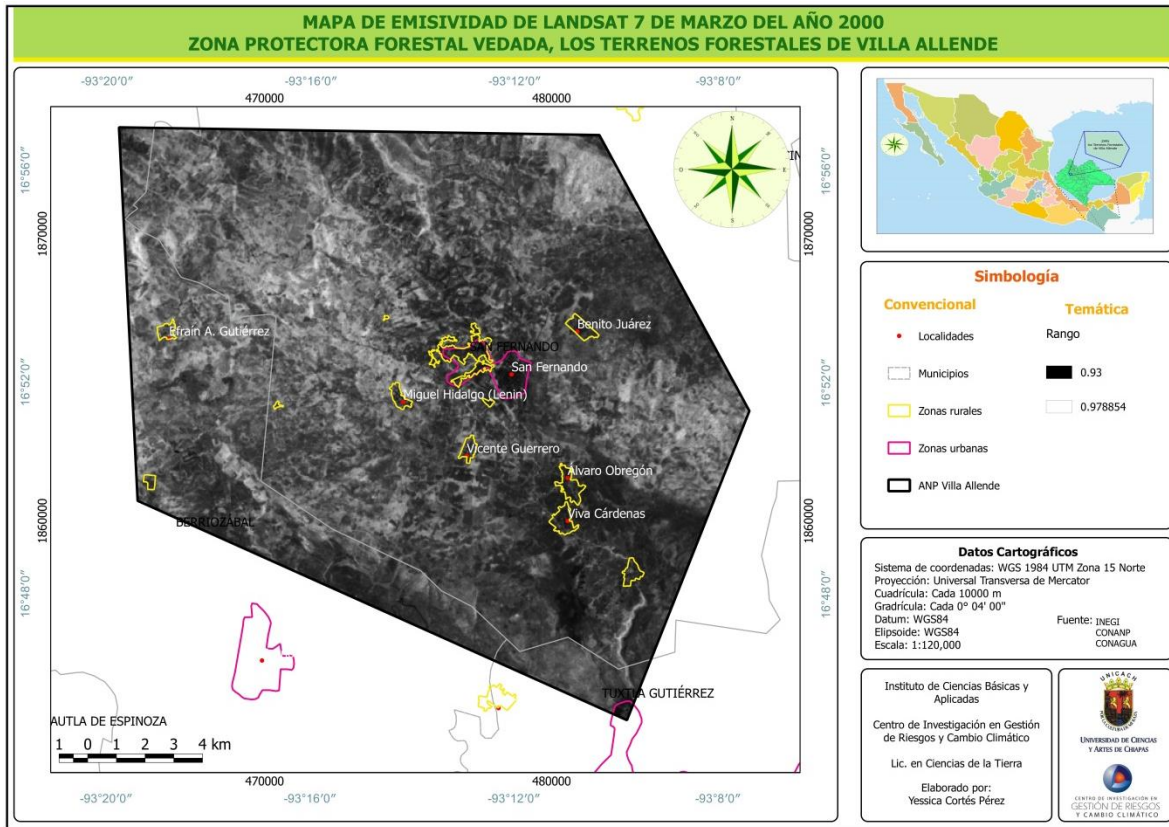
A continuación en el siguiente apartado se muestran los valores resultantes del cálculo de la emisividad obtenida apartir del NDVI.

d) Emisividad

Una vez que se realizaron los pre-procesamientos o correcciones de las bandas y el cálculo del NDVI se continuó con el procesamiento de los resultados ya obtenidos, primeramente con el cálculo de la emisividad, seguido del cálculo de la Temperatura Brillo (TB) y por último el cálculo de la temperatura superficial en grados Celsius (°C).

Los valores calculados de emisividad se refieren a los correspondientes de la radiación térmica emitida por la superficie u objeto debido a su temperatura, de acuerdo con Lillesand y Kiefer, 1996, citado por Martínez *et al.*, 2014 el valor promedio de emisividad de vegetación es igual 0.98, como corrección de emisión espectral y 0.93 como

valor de la emisividad del suelo. En el mapa 13 se muestra el rango obtenido en el cálculo de la emisividad y su distribución en el área de estudio.



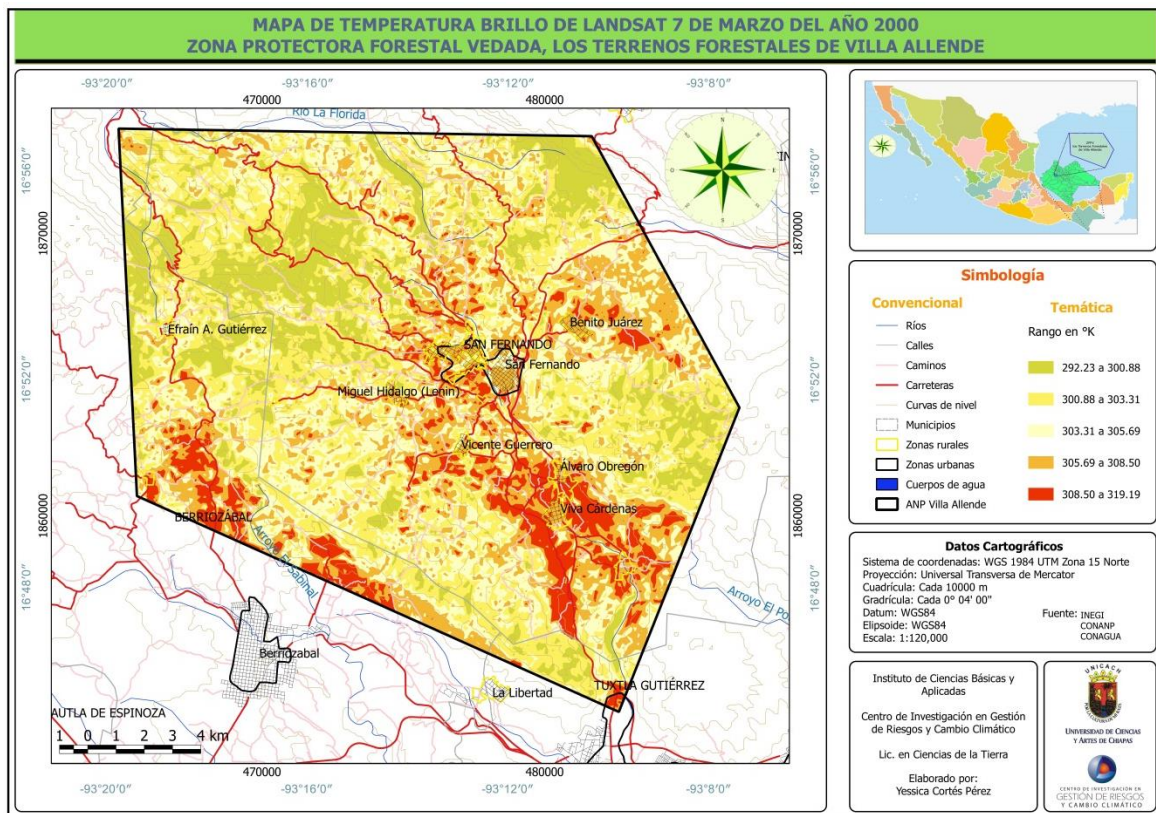
Mapa 13. Emisividad de Landsat 7 dentro del ANP

Según los resultados arrojados de la emisividad de la superficie del área de estudio van de un rango de 0.93 a 0.978854, donde los valores de 0.93 corresponden a centros de población y vías de comunicación como carreteras y caminos, así mismo los valores igual o cercanos a 0.978854 corresponde a sitios donde la vegetación se encuentra en mejores condiciones de conservación, estas áreas se ubican principalmente en la porción noroeste y este del ANP.

Como antepenúltimo proceso de la imagen Landsat 7 se calculó la TB cuyo resultado se muestra a continuación.

e) Temperatura brillo (TB)

El siguiente resultado corresponde al cálculo de la TB en grados Kelvin, parámetro que permitió calcular la energía emitida por los objetos o cuerpos presentes en la superficie la cual va en función de su longitud de onda dependiendo de la temperatura a la que estén expuestos. Los resultados obtenidos se pueden visualizar en el mapa 14.



Mapa 14. Temperatura brillo de Landsat 7

Como se puede observar en el mapa 14 las áreas con mayor TB se representan en color rojo las cuales corresponden a centros urbanos y a las áreas de influencia de las

carreteras principalmente las ubicadas en las porciones sur, este, oeste y en menor proporción las del lado norte del ANP con un rango de TB de 308.50 a 319.19 °K (35.35 a 46.04 °C).

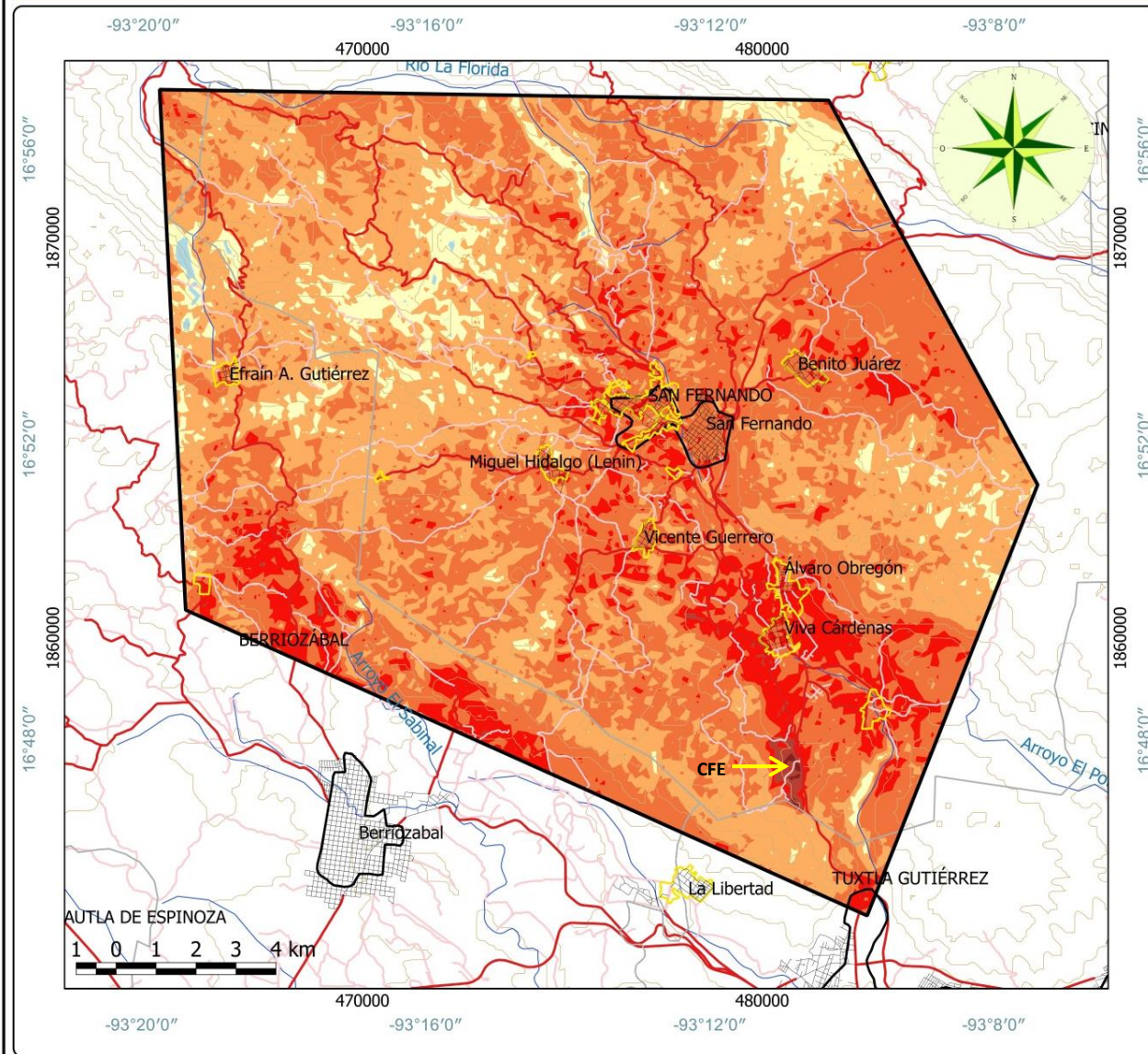
Así mismo se ubican aquellas áreas con menor TB localizadas con mayor evidencia en las porciones noroeste y noreste del polígono de estudio con un rango de TB de 292.23 a 300.88 °K.

De acuerdo con la metodología representada en el mapa conceptual de la figura 5, se procedió al cálculo de la TS como último proceso para la identificación de islas de calor presentadas en el año 2000.

f) Temperatura superficial

En seguida se muestra el mapa correspondiente a la TS obtenida para el mes de marzo del año 2000 (ver mapa 15).

**MAPA DE TEMPERATURA SUPERFICIAL DE MARZO DEL AÑO 2000
ZONA PROTECTORA FORESTAL VEDADA, LOS TERRENOS FORESTALES DE VILLA ALLENDE**

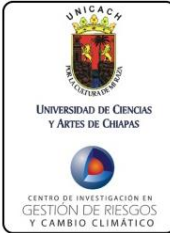


Simbología

Convencional	Temática
— Ríos	Rango en °C
— Calles	21.02 a 25
— Caminos	25 a 30
— Carreteras	30 a 35
— Curvas de nivel	35 a 40
□ Municipios	40 a 45
□ Zonas rurales	45 a 50
□ Zonas urbanas	50 a 55
■ Cuerpos de agua	
□ ANP Villa Allende	

Datos Cartográficos
 Sistema de coordenadas: WGS 1984 UTM Zona 15 Norte
 Proyección: Universal Transversa de Mercator
 Cuadrícula: Cada 10000 m
 Gradícula: Cada 0° 04' 00"
 Datum: WGS84
 Elipsoide: WGS84
 Escala: 1:120,000
 Fuente: INEGI
 CONANP
 CONAGUA

Instituto de Ciencias Básicas y Aplicadas
 Centro de Investigación en Gestión de Riesgos y Cambio Climático
 Lic. en Ciencias de la Tierra
 Elaborado por:
 Yessica Cortés Pérez



Mapa 15. Temperatura Superficial en marzo del año 2000

A través del mapa 15 se puede visualizar cómo se comportaron las TS en marzo del año 2000. Según los valores calculados para esta fecha muestran rangos que oscilan entre los 21.02 a 55 °C, se puede observar en el lado sureste del ANP aquellas áreas donde la TS es evidentemente más alta, la cual oscila entre los 45 a 55 °C cubriendo una superficie de 73.18 ha equivalente al 0.34% del área total; este rango de temperatura se puntualiza en la subestación eléctrica El Sabino de la CFE ubicada en el tramo de la carretera Tuxtla Gutiérrez a San Fernando.

Por otra parte, las TS de 40 a 45 °C se presentan con mayor claridad en aquellos sitios de centros urbanos y en las vías de comunicación como en sus áreas de influencia, tal y como son los casos de Viva Cárdenas, Álvaro Obregón, Benito Juárez, San Fernando, Miguel Hidalgo (Lenin) y parte de Berriozábal; estas áreas cubren una superficie de 1,955 ha equivalente al 9.31% del área total del polígono, cabe mencionar que éstas se presentan en la parte sur, sureste y suroeste del ANP que, de acuerdo con el INEGI (2010), se encuentran áreas con usos agrícola y pecuario así como porciones de vegetación inducida.

De acuerdo con la distribución espacial y al área de cubrimiento las TS de 35 a 40 °C se observa que se presentaron de manera dispersa dentro de todo el área de estudio con una superficie de 43.71% equivalente a 9,181.55 ha, cabe mencionar que estas temperaturas son las más representativas puesto que casi ocupan el 50% del total del ANP. Según la carta de uso de suelo y vegetación (INEGI, 2010) en esta área se presentan porciones de vegetación inducida, selva perennifolia secundaria, selva caducifolia secundaria y uso pecuario.

En menor proporción ocupando el 40.57% se localizan áreas que oscilan entre los 30 a 35 °C, al igual que el anterior estas zonas se ubican de manera muy dispersa dentro de

toda el área de estudio, que según el INEGI (2010) presenta superficies con selva perennifolia secundaria, selva caducifolia secundaria y uso pecuario.

Sin embargo, a pesar de las altas temperaturas también se encuentran aquellas cálidas que van de 25 a 30 °C ubicadas en la parte norte, noroeste, noreste y en menor proporción en la parte este y sur del polígono, estas temperaturas abarcan una superficie total de 1,237.94 ha, dentro de las cuales se observan fragmentos de selva perennifolia secundaria, selva caducifolia secundaria y uso agrícola (INEGI, 2010).

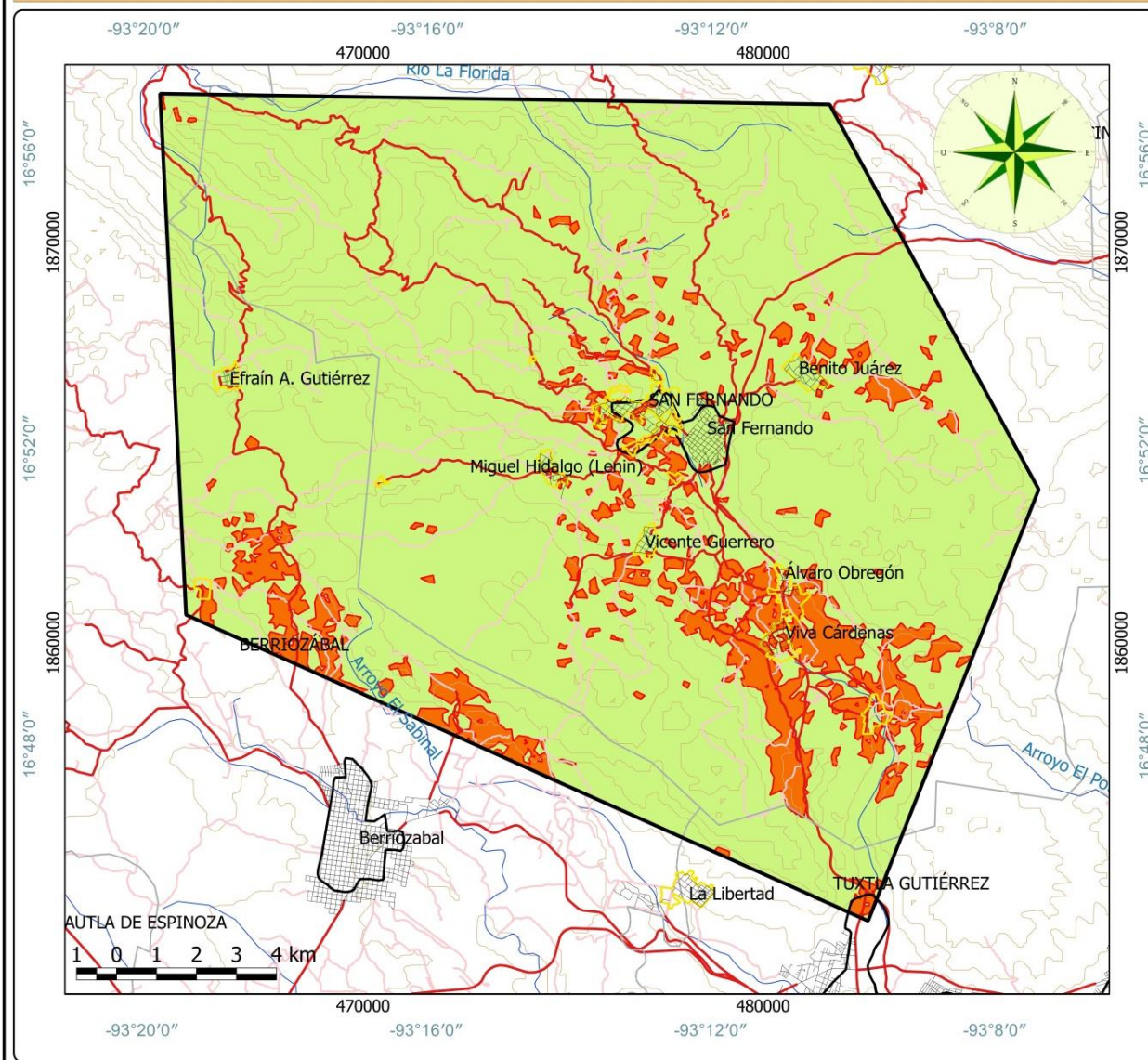
Así mismo, existen las temperaturas más bajas ubicadas en la parte norte y noroeste del polígono con una temperatura que oscilan entre los 21.02 a 25 °C las cuales cubren una superficie de 0.16% del área total. Cabe mencionar que estas temperaturas se presentan en la cima de las montañas ubicadas del lado este de la localidad Monterrey y del lado norte sobre el Ejido Efraín A. Gutiérrez donde se desarrolla una porción importante de selva perennifolia secundaria (INEGI, 2010).

Como producto final de los procesos se identificaron las islas de calor que se presentaron en marzo del año 2000, a continuación se presenta el resultado obtenido.

g) Islas de calor

En el siguiente resultado se presenta el mapa de islas de calor identificadas dentro del área de estudio en marzo del año 2000 (ver mapa 16) las cuales fueron obtenidas a partir de las temperaturas superficiales calculadas para este análisis.

**MAPA DE ISLAS DE CALOR PRESENTADAS EN MARZO DEL AÑO 2000
ZONA PROTECTORA FORESTAL VEDADA, LOS TERRENOS FORESTALES DE VILLA ALLENDE**



Simbología

Convencional

Temática

- Ríos
- Calles
- Caminos
- Carreteras
- Curvas de nivel
- Municipios
- Zonas rurales
- Zonas urbanas
- Cuerpos de agua
- ANP Villa Allende

- Islas de calor

Datos Cartográficos

Sistema de coordenadas: WGS 1984 UTM Zona 15 Norte
 Proyección: Universal Transversa de Mercator
 Cuadrícula: Cada 10000 m
 Gradícula: Cada 0° 04' 00"
 Datum: WGS84
 Elipsoide: WGS84
 Escala: 1:120,000

Fuente: INEGI
 CONANP
 CONAGUA

Instituto de Ciencias Básicas y Aplicadas
 Centro de Investigación en Gestión de Riesgos y Cambio Climático

Lic. en Ciencias de la Tierra

Elaborado por:
 Yessica Cortés Pérez



Mapa 16. Islas de calor de marzo del año 2000

En el mapa 16 se observa la distribución de las islas de calor que se presentaron en marzo del año 2000.

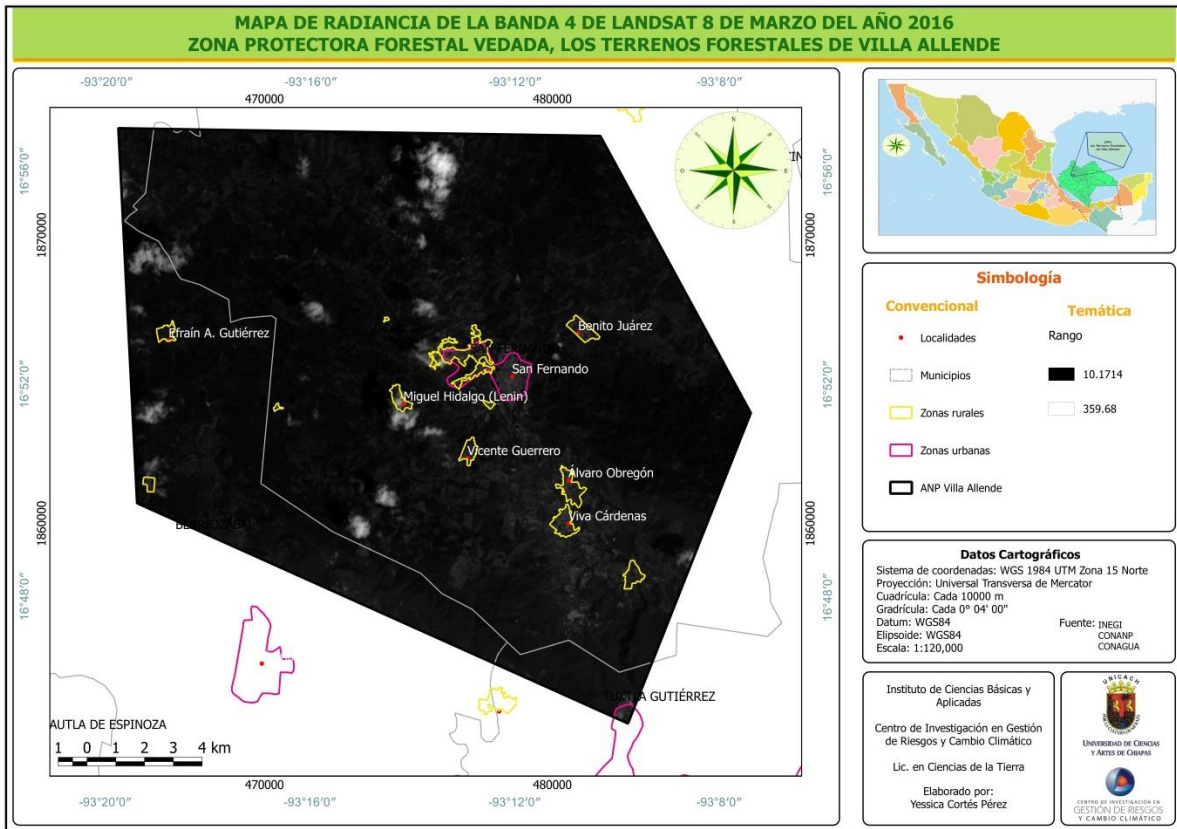
Las islas de calor presentadas en ese momento alcanzaron una TS entre 40 y 55 °C, como se puede observar en el mapa anterior las islas de calor se presentaron en diversas áreas del ANP con mayor evidencia en los alrededores de los centros de población principalmente en Viva Cárdenas, Álvaro Obregón, áreas colindantes con el municipio de Berriozábal y en menor proporción Benito Juárez, Miguel Hidalgo (Lenin), Vicente Guerrero y la cabecera municipal de San Fernando, además de las áreas aledañas a las vías de comunicación siendo más notorio en la carretera de Tuxtla Gutiérrez – San Fernando.

Los resultados anteriormente expuestos corresponden a los arrojados para las imágenes de Landsat 7 de marzo del año 2000. En el siguiente apartado se muestran los resultados obtenidos para Landsat 8 de marzo del año 2016, así como las islas de calor para ambos años.

Con respecto a Landsat 8 del mes de marzo del año 2016 se obtuvieron los siguientes resultados.

a) Corrección radiométrica

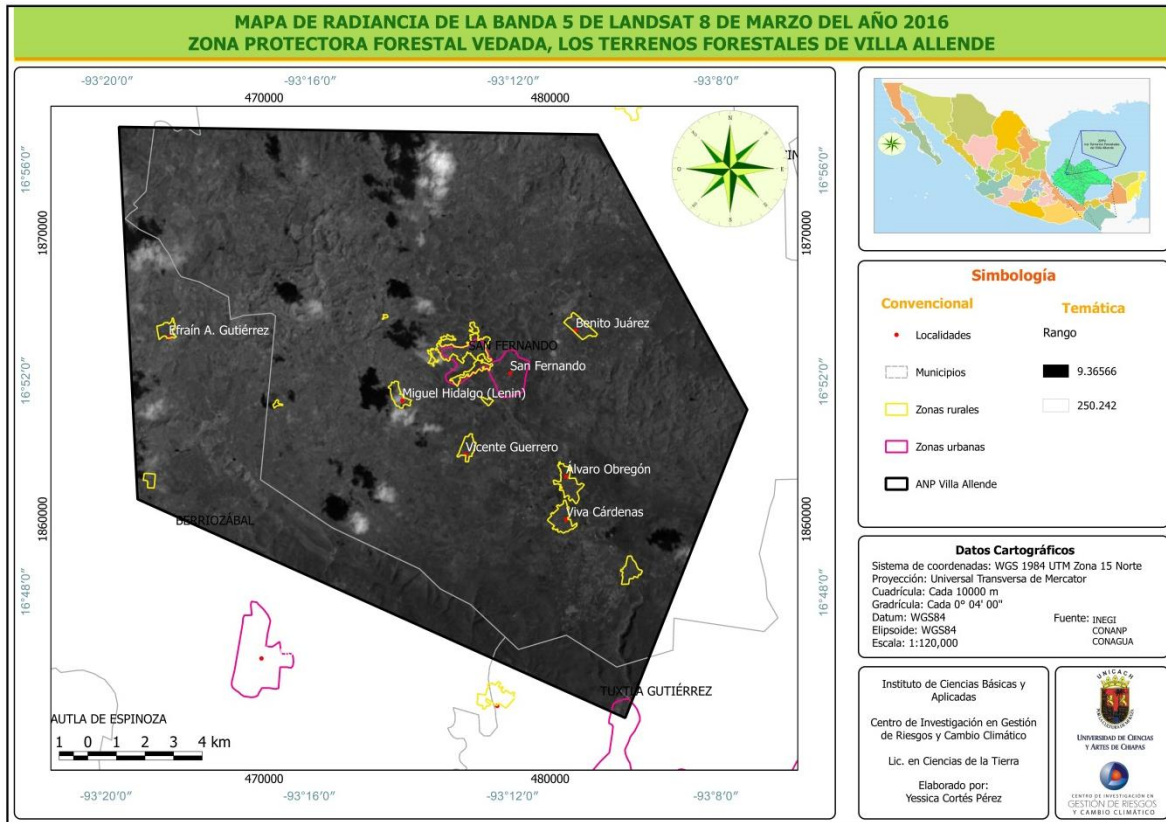
A continuación se muestran los mapas obtenidos de la corrección radiométrica de las bandas 4, 5 y 10 de Landsat 8 (ver mapas 17, 18 y 19).



Mapa 17. Radiancia de la banda 4 de Landsat 8

A través del mapa anterior se representa el resultado obtenido de la conversión de DN a radiancia de la banda 4 de Landsat 8, en color negro las áreas con valores de 10.1714 y de color blanco aquellas zonas que tienen una radiancia de 359.68; como se puede observar la escala de colores del rango va de negro a blanco. Es posible identificar con claridad aquellas áreas de color blanquecino las cuales representan cúmulos de nubes ubicadas en las porciones norte, oeste y noroeste.

En el siguiente mapa se visualiza el resultado obtenido de radiancia de la banda 5 para Landsat 8 (ver mapa 18).

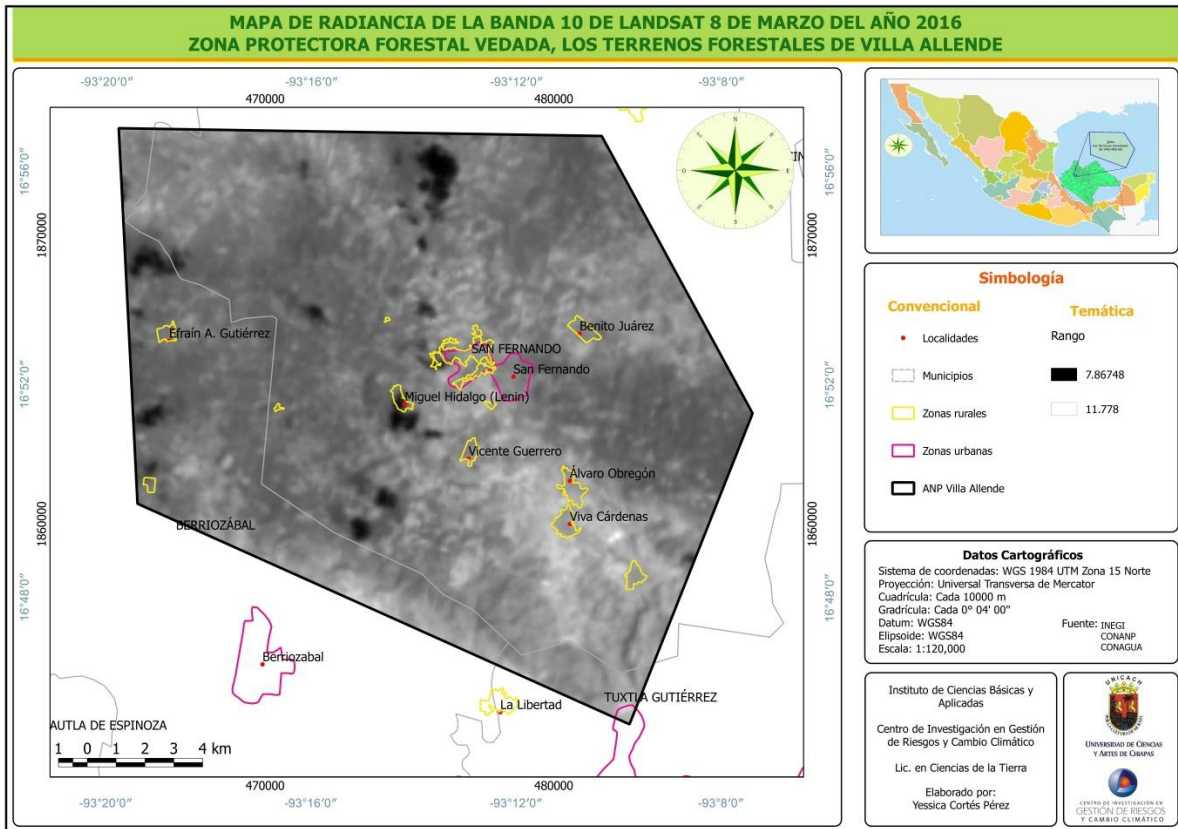


Mapa 18. Radiancia de la banda 5 de Landsat 8

El mapa anteriormente expuesto presenta los valores obtenidos de radiancia de la banda 5. De acuerdo con los resultados se visualizan de color negro las áreas con radiancia de 9.36566 y de color blanco las áreas con mayor radiancia es decir 250.242.

Con base en los resultados obtenidos es necesario mencionar que las condiciones atmosféricas presentadas el día de la toma de la imagen contiene nubosidad, condición que permitió que ciertas áreas adquirieran los valores más altos de radiancia.

A continuación se presenta el mapa de radiancia calculada para la banda térmica de Landsat 8 (ver mapa 19).

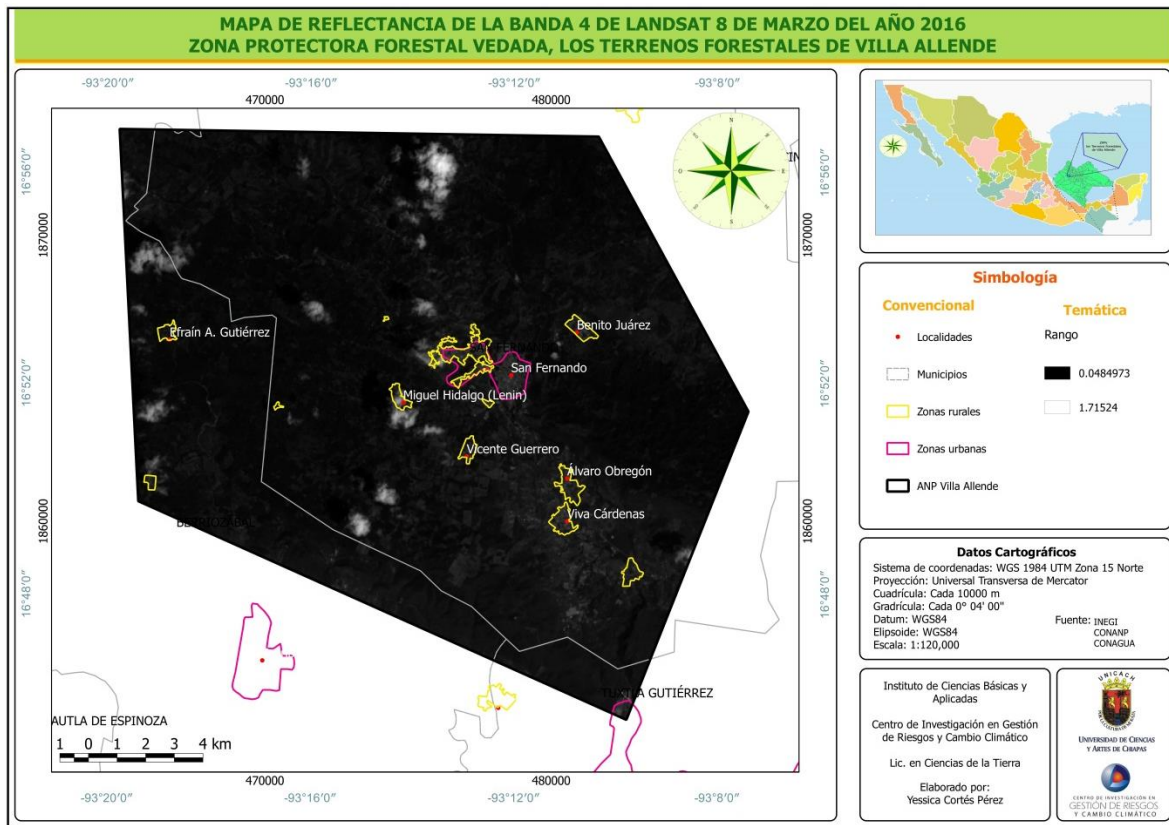


Mapa 19. Radiancia de la banda 10 de Landsat 8

Como se puede ver en el mapa 19 los valores de los niveles más bajos de radiancia, para ser más precisos el rango de 7.86748 representados en color negro, corresponden a las nubes presentadas en esta escena.

Los valores más altos de radiancia se asocian con las áreas de centros de población y zonas aledañas además de presentarse sobre el tramo de la carretera Tuxtla Gutiérrez a San Fernando, estos sitios se pueden visualizar en el mapa de color blanquecino ubicados principalmente en las porciones centro y sur del ANP.

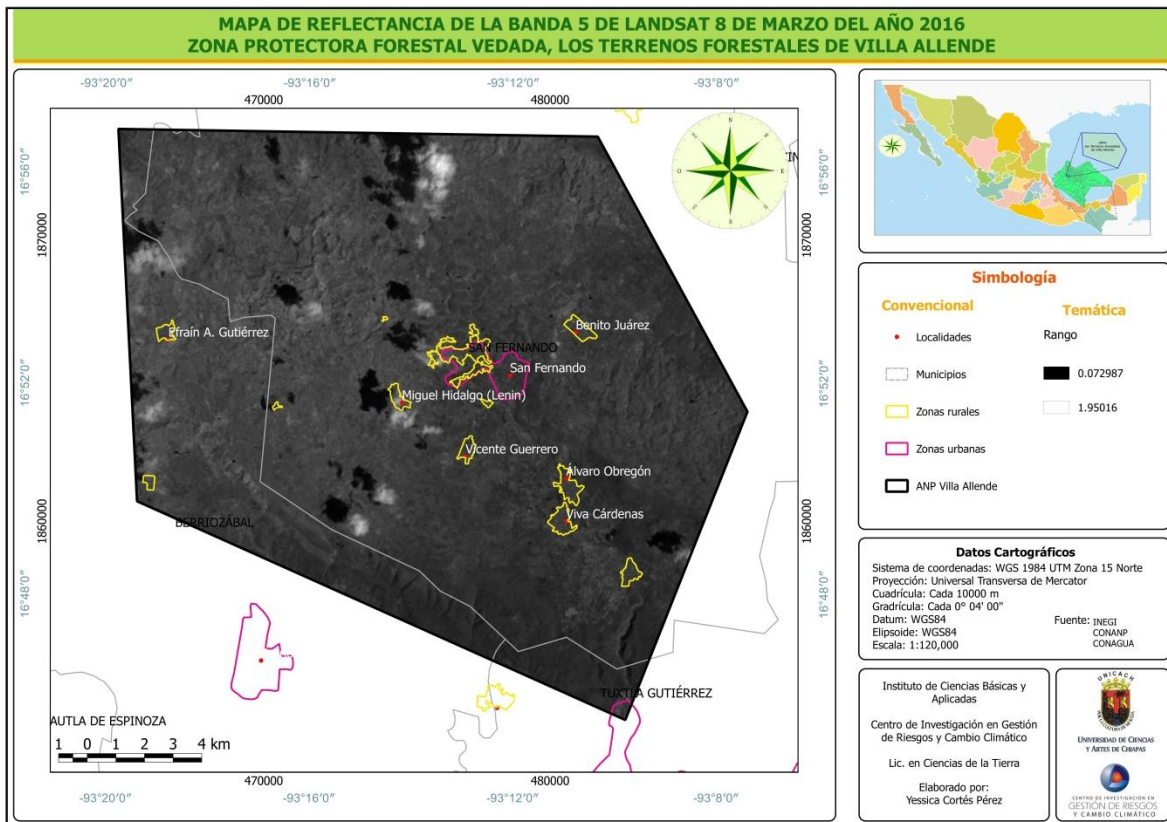
El siguiente pre-procesamiento es el cálculo de la reflectancia aparente calculada solo para las bandas 4 y 5 de Landsat 8. A través de los siguientes mapas se pueden visualizar los resultados obtenidos para estas bandas (ver mapas 20 y 21)



Mapa 20. Reflectancia de la banda 4 de Landsat 8

A través del mapa 20 se presenta el resultado obtenido de reflectancia de la banda 4 de Landsat 8 en una escala de colores de negro a blanco, en donde el color negro representa el valor mínimo de reflectancia equivalente a 0.0484973 y en color blanco el valor máximo (1.71524). Como se puede observar en las porciones norte, oeste y noroeste de la ZPFV se presentan áreas con los valores máximos de reflectancia las cuales corresponden a cúmulos de nubes y las áreas con menor reflectancia se ubican en los lados este, noreste y en menor proporción en los lados noroeste y oeste del área de estudio.

A continuación se presenta en el mapa 21 los valores obtenidos de reflectancia de la banda 5 de Landsat 8.



Mapa 21. Reflectancia de la banda 5 de Landsat 8

De acuerdo con el resultado arrojado en el cálculo de la reflectancia aparente para la banda 5, se puede visualizar en el mapa 21 una escala de colores de negro a blanco de acuerdo con el rango correspondiente, valores que van de 0.072987 hasta 1.95016. Sin embargo, cabe mencionar que al igual que los resultados anteriores de Landsat 8, estas imágenes también presentan nubosidad.

Con los valores más bajos y más altos se muestran tanto las sombras como los cúmulos de nubes, respectivamente, ubicados en las porciones norte y noroeste del

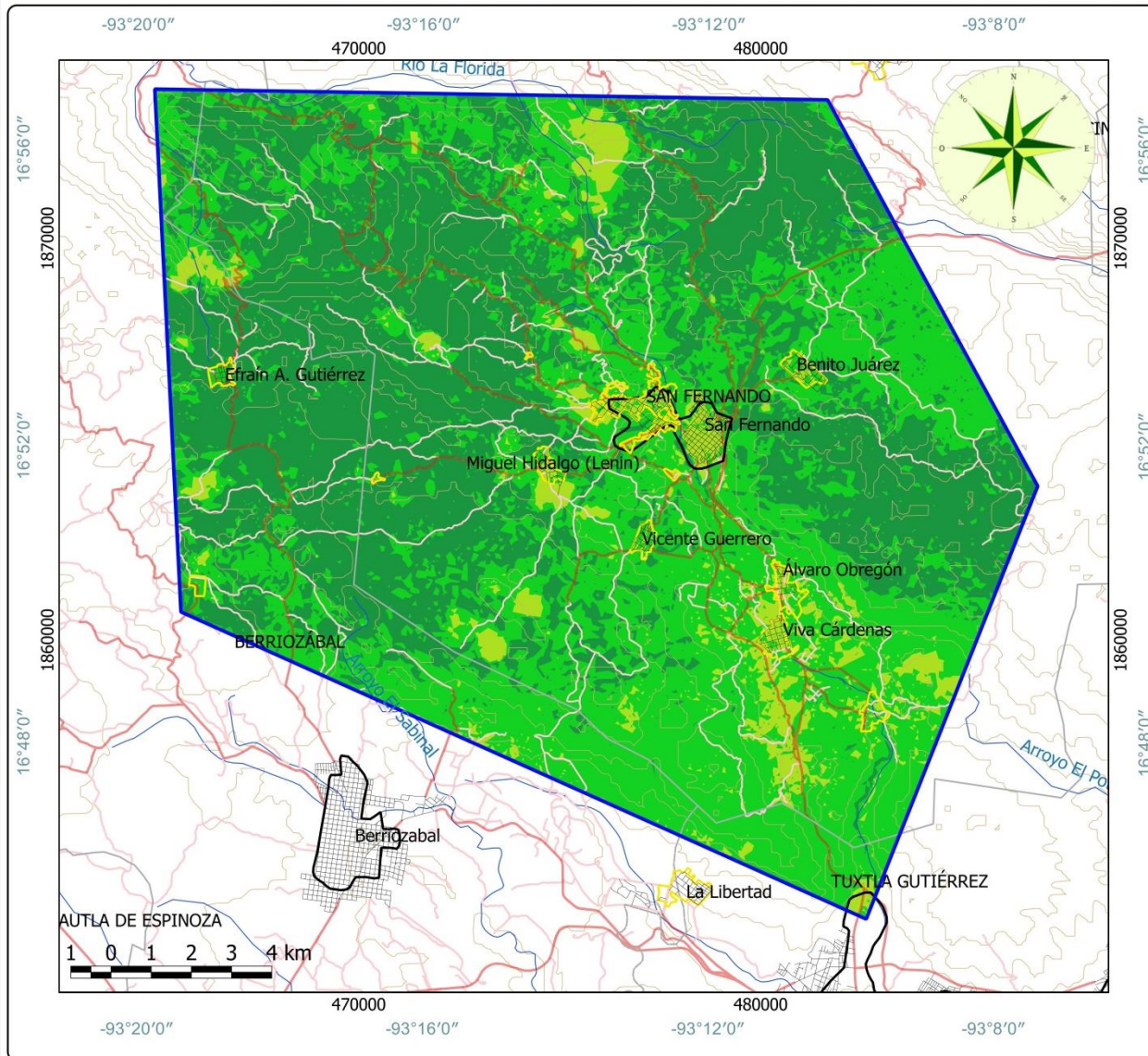
polígono en estudio. Cabe mencionar que los lugares con menor reflectancia (sin tomar en cuenta las nubes) corresponden a los centros poblacionales tales como San Fernando, Álvaro Obregón, Viva Cárdenas, Benito Juárez, Miguel Hidalgo (Lenin), Efraín A. Gutiérrez y la periferia de Tuxtla Gutiérrez, ubicados principalmente en las porciones centro, sur y sureste del polígono de estudio.

Continuando con la metodología en el siguiente apartado se muestran los resultados obtenidos del cálculo del NDVI.

b) Cálculo del NDVI

Mediante el siguiente mapa se presentan los resultados obtenidos del cálculo del NDVI los cuales se describen detalladamente más adelante (ver mapa 22).

MAPA DE ÍNDICE NORMALIZADO DIFERENCIAL DE LA VEGETACIÓN DE MARZO DEL AÑO 2016 ZONA PROTECTORA FORESTAL VEDADA, LOS TERRENOS FORESTALES DE VILLA ALLENDE



Simbología

Convencional

- Ríos
- Calles
- Caminos
- Carreteras
- Curvas de nivel
- Municipios
- Zonas rurales
- Zonas urbanas
- Cuerpos de agua
- ANP Villa Allende

Temática

Rango

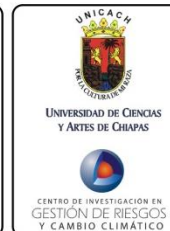
- 0 a 0.30
- -0.20 a 0
- 0.30 a 0.60
- 0.60 a 0.90

Datos Cartográficos

Sistema de coordenadas: WGS 1984 UTM Zona 15 Norte
 Proyección: Universal Transversa de Mercator
 Cuadrícula: Cada 10000 m
 Gradícula: Cada 0° 04' 00"
 Datum: WGS84
 Elipsoide: WGS84
 Escala: 1:120,000

Fuente: INEGI
 CONANP
 CONAGUA

Instituto de Ciencias Básicas y Aplicadas
 Centro de Investigación en Gestión de Riesgos y Cambio Climático
 Lic. en Ciencias de la Tierra
 Elaborado por:
 Yessica Cortés Pérez



Mapa 22. NDVI de marzo del año 2016

Los resultados arrojados del NDVI se representan a través del mapa 22 donde se puede visualizar las características que presentaba la vegetación en marzo del año 2016 de acuerdo con el índice de vegetación que se calculó para ese entonces. Como es posible apreciar, la vegetación se encontraba en un estado de salud favorable permitiendo que los rangos del NDVI alcanzaran un valor de hasta 0.90 en la mayor parte del polígono.

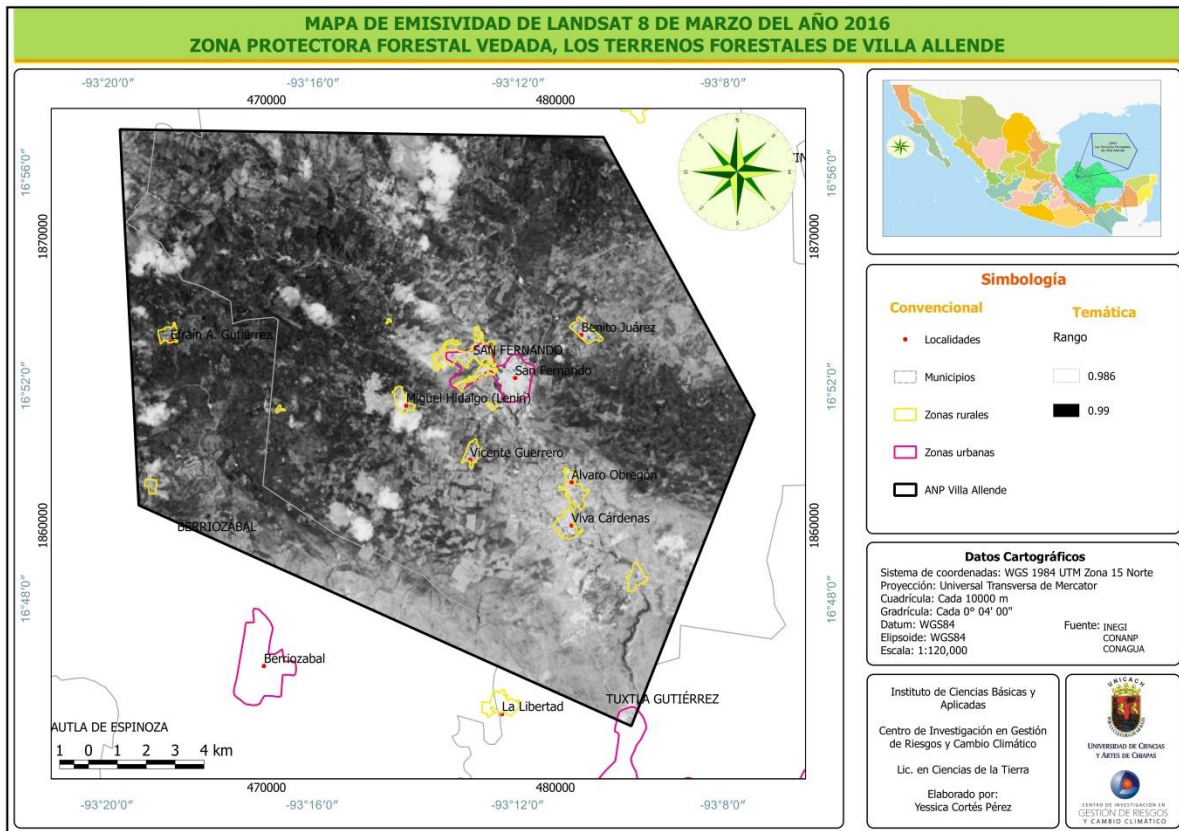
De acuerdo con los resultados obtenidos, el 47.26% del área de estudio se encuentra con una vegetación bastante saludable (Soto *et al.*, 2012) en un rango de NDVI de 0.60 a 0.90 localizados principalmente en la zona noroeste, noreste y este del ANP.

Enseguida se ubican aquellas áreas con un NDVI de 0.30 a 0.60 los cuales se localizan en aquellos sitios donde han tenido una influencia directa los asentamientos humanos incluyendo carreteras y caminos. Este rango se presenta principalmente en las partes norte, este y sureste del ANP, así como en el Ejido Efraín A. Gutiérrez; de acuerdo con lo anterior, este rango abarca una superficie total de 9,777.51 ha correspondientes al 46.55% del área total.

Por último se ubican aquellas áreas con rango de NDVI de 0 a 0.30 abarcando el 6.18% del polígono en estudio, éste se localiza de manera puntual dentro de los centros poblacionales tales como: Viva Cárdenas, Álvaro Obregón, Vicente Guerrero, Miguel Hidalgo (Lenin), Benito Juárez y la cabecera municipal de San Fernando.

Los resultados anteriores corresponden al pre-procesamiento y/o corrección de las bandas. A partir de estos resultados se realizaron los procesos de las imágenes, iniciando con el cálculo de la emisividad para el mes de marzo del año 2016 de Landsat 8.

c) Emisividad



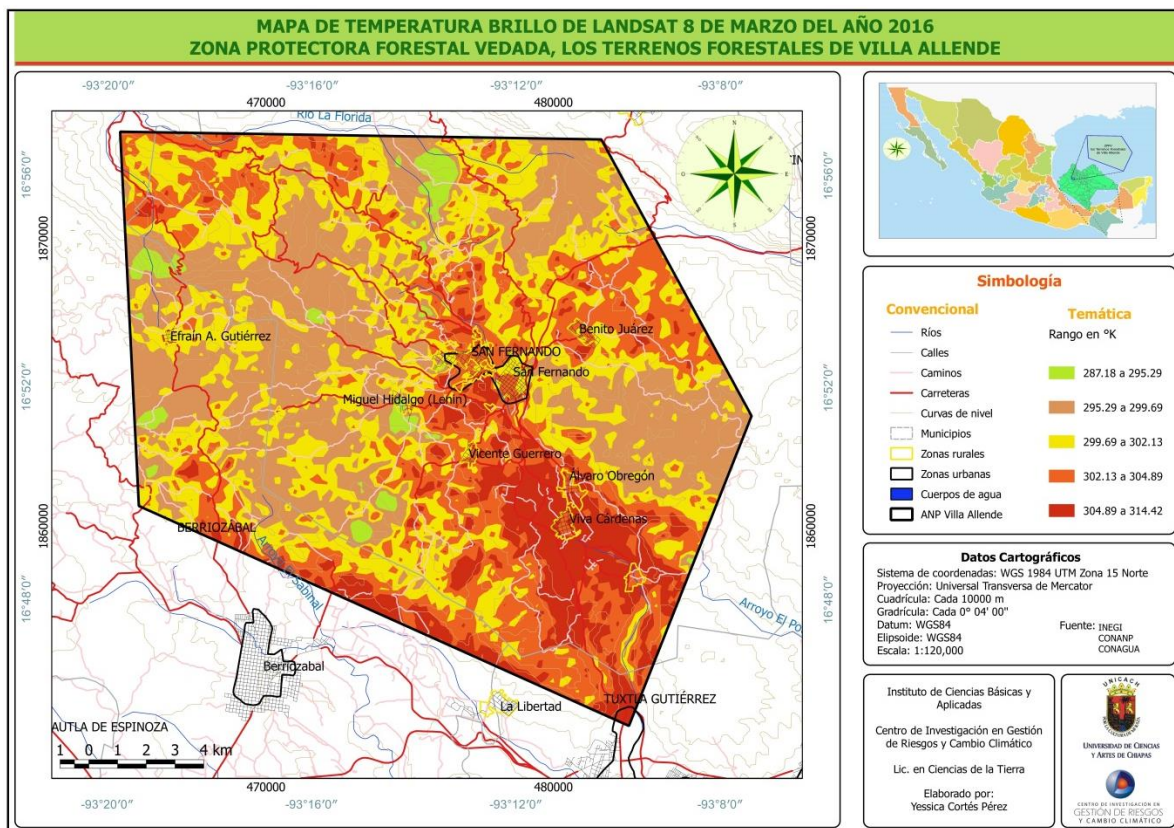
Mapa 23. Emisividad de la imagen Landsat 8 dentro del ANP

Según los resultados obtenidos en el cálculo de la emisividad representados en el mapa 23 de Landsat 8 se obtuvieron los valores 0.98 y 0.99 que de acuerdo con las características presentadas en la superficie, el valor 0.99 corresponde a aquellas áreas que presentan algún tipo de vegetación y los valores de 0.98 a las áreas con influencia antropogénica incluyendo a los centros de población, excepto los sitios que se encuentran en las porciones norte, oeste y noroeste del polígono los cuales corresponden a la presencia de nubes que se representan en colores más blancos que la demás superficie.

En el siguiente apartado se muestra el resultado obtenido de la TB (energía emitida por los objetos o cuerpos presentes en la superficie) presente en el área de estudio en marzo del año 2016 de acuerdo con la imagen de satélite de Landsat 8.

d) Temperatura brillo

A continuación se muestra el mapa 24 correspondiente a la TB, este mapa proporciona la estimación de la energía emitida por los cuerpos en la superficie de acuerdo con la temperatura a la que están expuestos, los valores resultantes se expresan en grados Kelvin.



Mapa 24. Temperatura brillo de Landsat 8

Cabe mencionar que los rangos visualizados de color verde con valores de 287.18 a 295.29 °K (14.03 a 22.14 °C) corresponden a la nubosidad presentada en la escena.

Como se puede ver el rango de TB en la superficie va de 295.29 a 314.42 °K (22.14 a 41.27 °C), en el cual se aprecia claramente que las áreas con mayor temperatura brillo corresponden a espacios con influencia antropogénica como la carretera de Tuxtla Gutiérrez a San Fernando y la colindancia del lado sur del polígono de San Fernando, así mismo aquellas áreas periféricas de Berriozábal y Tuxtla Gutiérrez.

Los valores con menor TB corresponden a las áreas con mayor presencia de vegetación ubicadas en las porciones noroeste, norte, noreste y este del ANP, estas áreas se presentan en color café claro con un rango de 295.29 a 299.69 °K (22.14 a 26.54 °C).

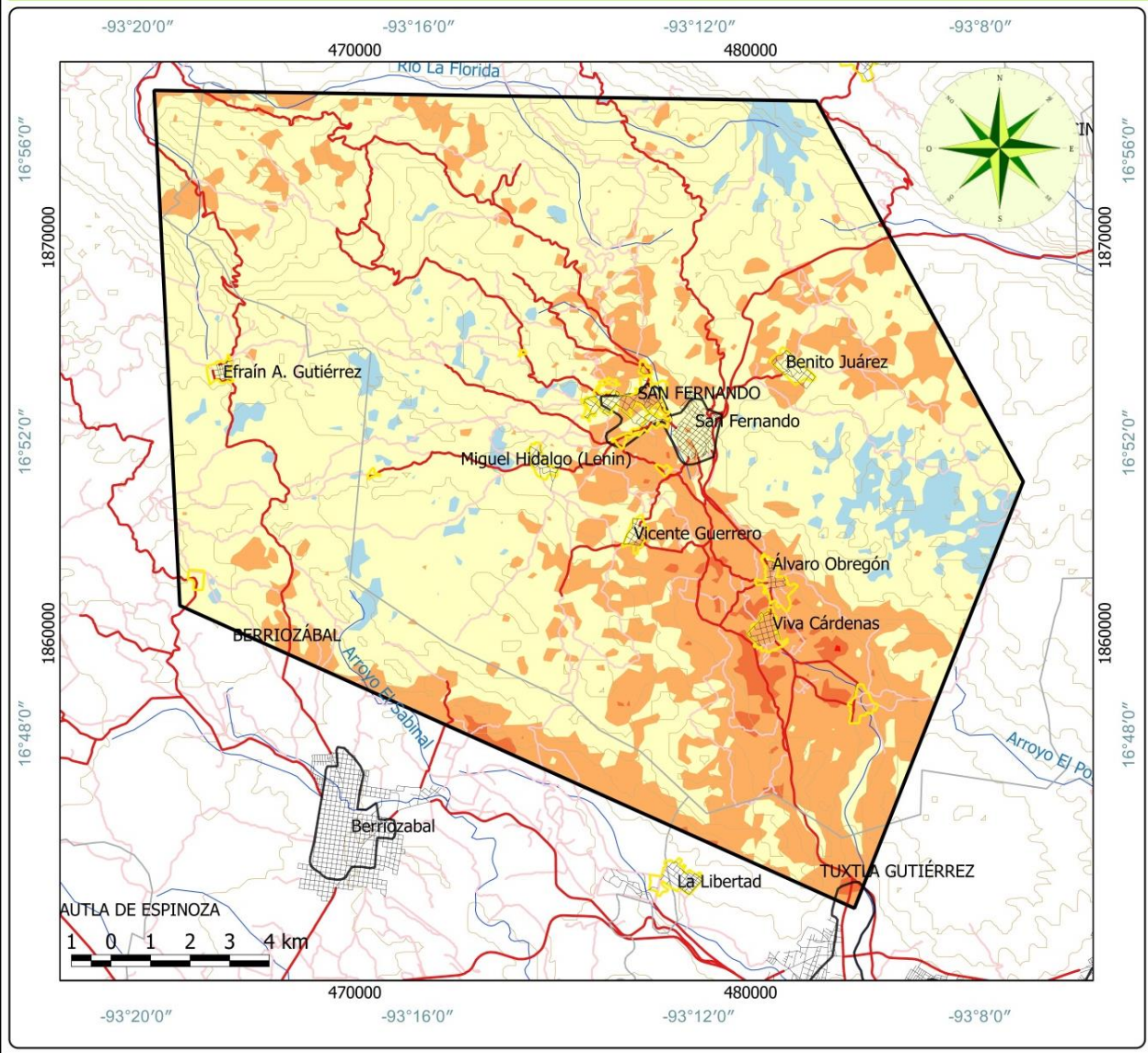
Finalizando con los procesos se calculó la TS de marzo del año 2016 en donde se presenta el resultado a continuación.

e) Temperatura superficial

Como último proceso se realizó el cálculo de la temperatura superficial el cual a través de éste se identificó cuáles fueron las islas de calor presentadas para marzo del año 2016.

En seguida se muestra el mapa 25 donde se presentan las TS calculadas para marzo del año 2016, en el que se pueden apreciar diferentes rangos de temperatura localizados de manera dispersa dentro del área de estudio, los detalles del resultado se describen más adelante.

MAPA DE TEMPERATURA SUPERFICIAL DE MARZO DEL AÑO 2016 ZONA PROTECTORA FORESTAL VEDADA, LOS TERRENOS FORESTALES DE VILLA ALLENDE



Simbología

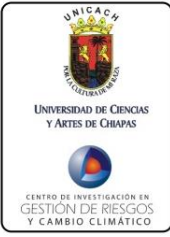
Convencional	Temática
Ríos	Rango en °C
Calles	20 a 25
Caminos	25 a 30
Carreteras	30 a 35
Curvas de nivel	35 a 40
Municipios	40 a 45
Zonas rurales	
Zonas urbanas	
Cuerpos de agua	
ANP Villa Allende	

Datos Cartográficos

Sistema de coordenadas: WGS 1984 UTM Zona 15 Norte
 Proyección: Universal Transversa de Mercator
 Cuadrícula: Cada 10000 m
 Gradícula: Cada 0° 04' 00"
 Datum: WGS84
 Elipsoide: WGS84
 Escala: 1:120,000

Fuente: INEGI
CONANP
CONAGUA

Instituto de Ciencias Básicas y Aplicadas
 Centro de Investigación en Gestión de Riesgos y Cambio Climático
 Lic. en Ciencias de la Tierra
 Elaborado por:
 Yessica Cortés Pérez



Mapa 25. Temperatura Superficial en marzo del año 2016

Durante marzo del año 2016 las TS oscilaron entre los 20 y 45 °C. De acuerdo con lo obtenido para esta área en estudio, las TS predominantes oscilan entre 25 y 30 °C las cuales abarcan más de la mitad del ANP, para ser más precisos un 69.60% del área total ubicados en casi todo el polígono excepto en las zonas sur y sureste del mismo. Dichas características se presentan en los Ejidos Efraín A. Gutiérrez, Miguel Hidalgo (Lenin), Vicente Guerrero, San Fernando y Benito Juárez.

Aquellas áreas que presentan una TS del rango 30 a 35 °C se ubican alrededor de los centros de población y en la vía de comunicación entre la ciudad de Tuxtla Gutiérrez con la cabecera municipal de San Fernando, estos sitios abarcan una superficie de 5,195.57 ha. Dentro de las localidades que presentan estas condiciones se encuentra: Viva Cárdenas y Álvaro Obregón y en menor proporción San Fernando, Vicente Guerrero y Benito Juárez.

También se encuentran aquellos sitios donde la TS es relativamente menor que el resto, con un rango de 20 a 25 °C ubicados en las zonas noreste, este y oeste del polígono, estas temperaturas abarcan una superficie de 944.61ha equivalente al 4.5% del área total.

Así mismo es posible notar con claridad aquellas zonas con una TS de 35 a 40 °C ubicados en las colindancias de Viva Cárdenas, Álvaro Obregón, Vicente Guerrero y parte de Tuxtla Gutiérrez y Berriozábal, estos sitios cubren un 1.16% de la superficie total del ANP.

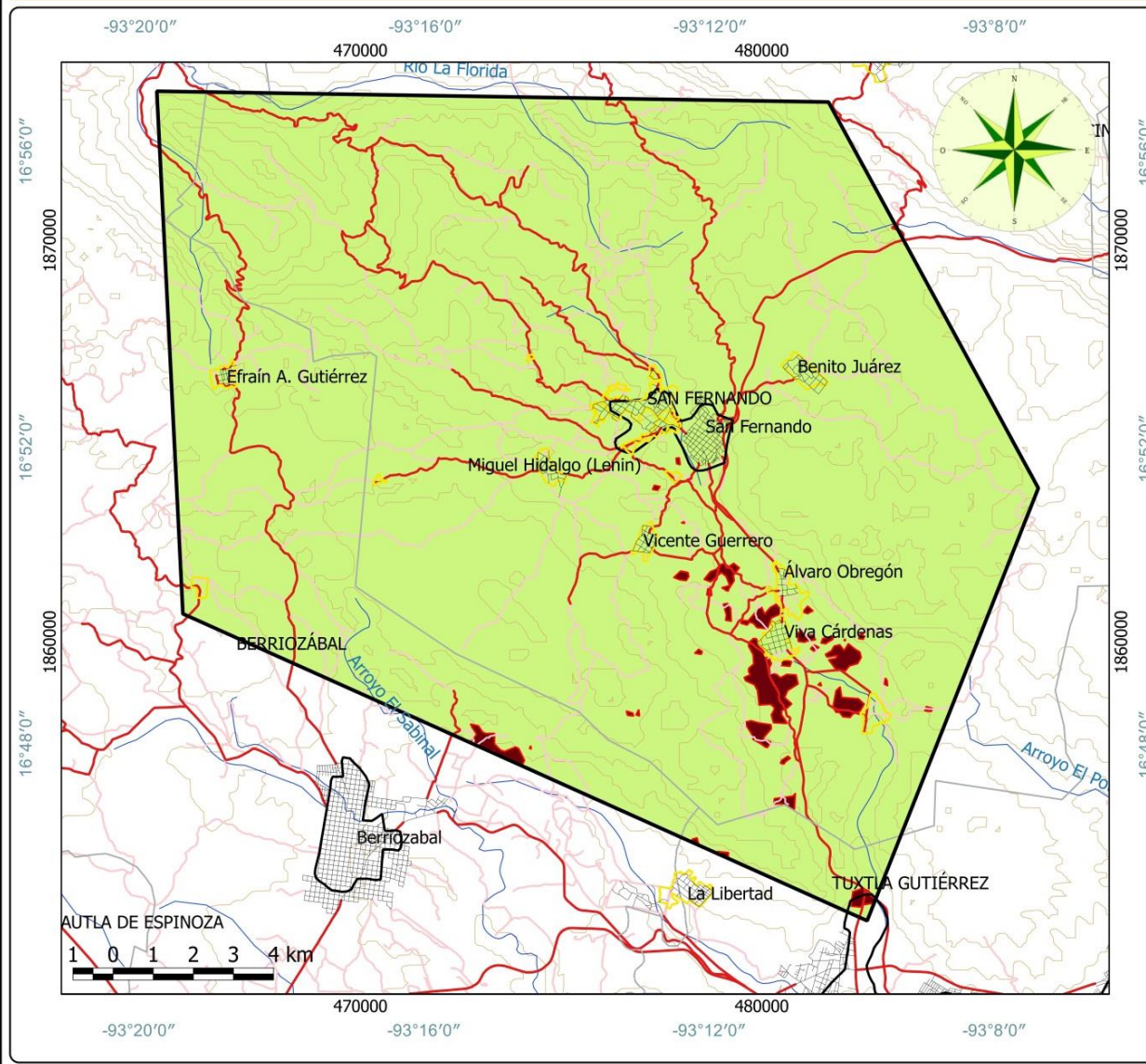
Sin embargo el área más puntual se ubica en el lado sureste de Viva Cárdenas con una TS que oscila entre 40 y 45 °C.

Los resultados anteriormente expuestos formaron parte de la delimitación de las islas de calor presentadas en ambos años (2000 y 2016), para finalizar se concluyen los resultados de este trabajo con lo siguiente.

f) Islas de calor

En los siguientes mapas (ver mapa 26 y 17) se presentan los resultados correspondientes a las islas de calor identificadas para el mes de marzo del año 2016, así como el mapa de las islas de calor identificadas en marzo de los años 2000 y 2016, respectivamente.

**MAPA DE ISLAS DE CALOR PRESENTADAS EN MARZO DEL AÑO 2016
ZONA PROTECTORA FORESTAL VEDADA, LOS TERRENOS FORESTALES DE VILLA ALLENDE**



Simbología

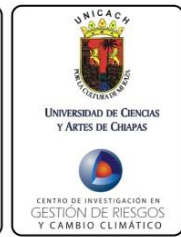
Convencional	Temática
— Ríos	■ Islas de calor
— Calles	
— Caminos	
— Carreteras	
— Curvas de nivel	
□ Municipios	
■ Zonas rurales	
■ Zonas urbanas	
■ Cuerpos de agua	
■ ANP Villa Allende	

Datos Cartográficos

Sistema de coordenadas: WGS 1984 UTM Zona 15 Norte
 Proyección: Universal Transversa de Mercator
 Cuadrícula: Cada 10000 m
 Gradícula: Cada 0° 04' 00"
 Datum: WGS84
 Elipsoide: WGS84
 Escala: 1:120,000

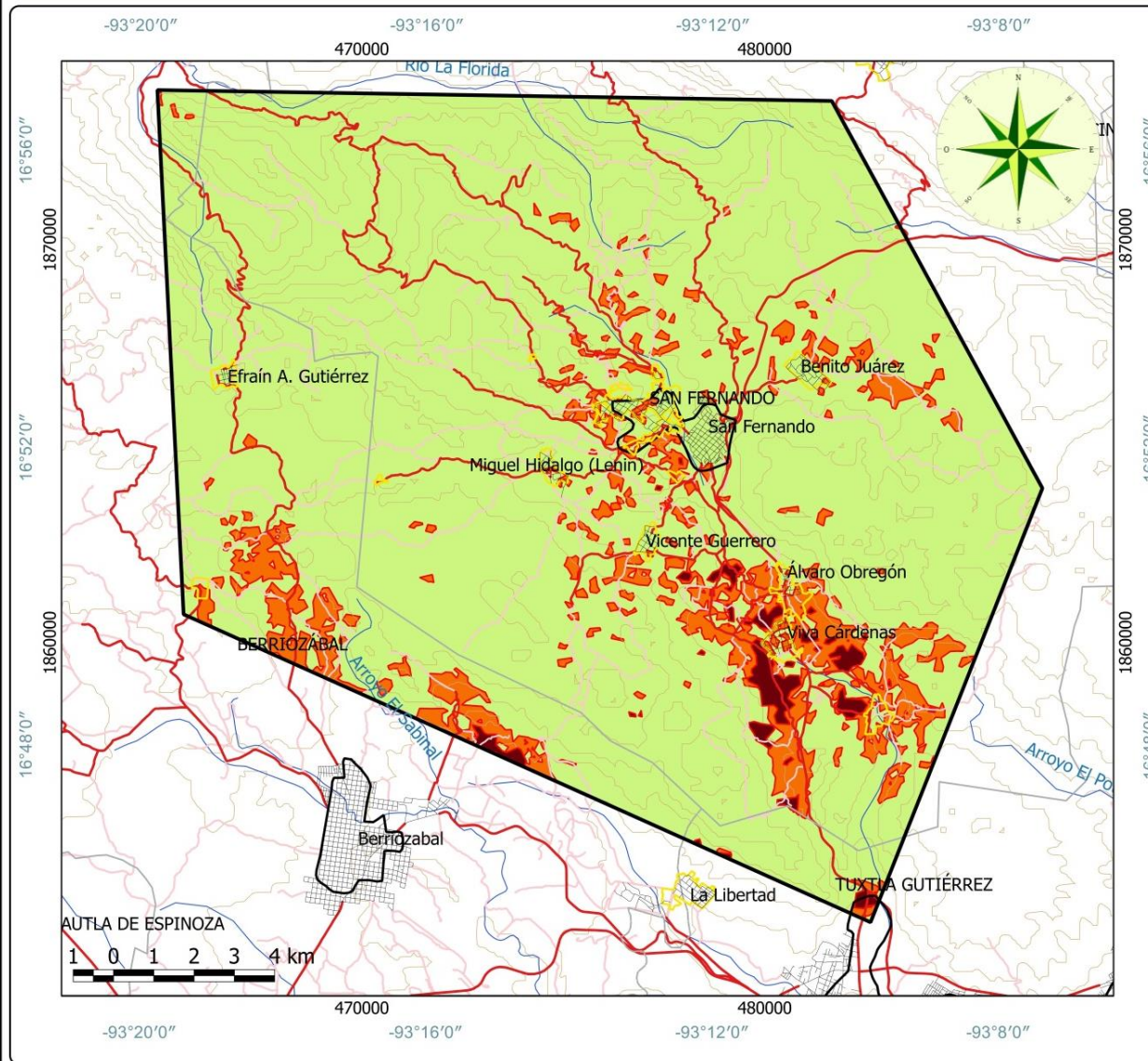
Fuente: INEGI
 CONANP
 CONAGUA

Instituto de Ciencias Básicas y Aplicadas
 Centro de Investigación en Gestión de Riesgos y Cambio Climático
 Lic. en Ciencias de la Tierra
 Elaborado por:
 Yessica Cortés Pérez



Mapa 26. Islas de calor identificadas en marzo del año 2016

**MAPA DE ISLAS DE CALOR PRESENTADAS EN EL MES DE MARZO DE LOS AÑOS 2000 Y 2016
ZONA PROTECTORA FORESTAL VEDADA, LOS TERRENOS FORESTALES DE VILLA ALLENDE**



Simbología

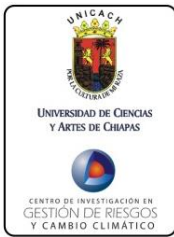
Convencional	Temática
Ríos	Islas de calor/ 2016
Calles	Islas de calor/ 2000
Caminos	
Carreteras	
Curvas de nivel	
Municipios	
Zonas rurales	
Zonas urbanas	
Cuerpos de agua	
ANP Villa Allende	

Datos Cartográficos

Sistema de coordenadas: WGS 1984 UTM Zona 15 Norte
 Proyección: Universal Transversa de Mercator
 Cuadrícula: Cada 10000 m
 Gradícula: Cada 0° 04' 00"
 Datum: WGS84
 Elipsoide: WGS84
 Escala: 1:120,000

Fuente: INEGI
 CONANP
 CONAGUA

Instituto de Ciencias Básicas y Aplicadas
 Centro de Investigación en Gestión de Riesgos y Cambio Climático
 Lic. en Ciencias de la Tierra
 Elaborado por:
 Yessica Cortés Pérez



Mapa 27. Islas de calor identificadas en marzo de los años 2000 y 2016

Como se puede apreciar en el mapa 26, las islas de calor presentadas en marzo del año 2016 alcanzaron una TS entre 35 y 45 °C. Se observa que las islas de calor se presentaron en sitios puntuales del ANP los cuales corresponden a las áreas que tienen influencia directa con las vías de comunicación, particularmente con aquella que enlaza a Tuxtla Gutiérrez con San Fernando ubicando con mayor claridad las áreas colindantes con los poblados de Viva Cárdenas y Álvaro Obregón, las cuales coinciden con áreas totalmente desprovistas de vegetación para uso agrícola y pecuario a baja escala, así como en las periferias de las ciudades de Tuxtla Gutiérrez y Berriozábal.

Finalmente, en el mapa 27 se muestran las islas de calor identificadas en el mes de marzo de ambos años, donde se aprecia que siguen siendo las mismas áreas de influencia de los centros de población y principal vía de comunicación donde se presenta este fenómeno.

Las islas de calor se ubicaron en las porciones centro, sur y oeste de la ZPFV las cuales corresponden a áreas con infraestructura urbana. También se observa que las islas de calor del año 2000 son más extensas y las del 2016 son sitios más puntuales, es decir, menos dispersos, pero ambas distribuidas en las mismas direcciones.

IV. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

El análisis de las imágenes satelitales correspondió al mes de marzo de los años 2000 y 2016 ya que este mes es uno de los más secos y con menor nubosidad del periodo anual en el área de estudio. Ésta condición permitió conocer el comportamiento de las temperaturas máximas así como la identificación de las islas de calor.

Los resultados obtenidos del NDVI para el mes de marzo del año 2000 se observa que los valores iguales o menores de cero (-0.30 a 0), se presenta escasez de vegetación principalmente en aquellas áreas donde se localizan los centros de población y áreas con un alto nivel de alteración ambiental como por ejemplo en los márgenes de la carretera Tuxtla Gutiérrez a San Fernando, así como aquellos sitios que presentan evidencias de actividades antropogénicas (agrícola, pecuaria o establecimientos de nuevos centros de población). Cabe mencionar que los valores anteriormente expuestos representan pequeñas áreas en proporción al total de la zona de estudio, como puede verse en la tabla 7 donde se especifica con mayor detalle los rangos de este índice, el área cubierta y el porcentaje correspondiente por cada uno de estos.

Tabla 7. Rangos del NDVI del mes de marzo del año 2000

NDVI marzo 2000	Rango	Área (ha)	%
	-0.35 a -0.30	0.09	0.00
	-0.30 a 0	119.949695	0.57
	0 a 0.30	10559.2696	50.27
	0.30 a 0.60	9960.55765	47.42
	0.60 a 0.90	363.532719	1.73

Es pertinente hacer mención que los valores del índice van de -1 a 1 (Meneses, 2011/2), donde el valor 1 representa a las zonas con cobertura total de vegetación; el valor 0 representa a zonas con escasa vegetación y el valor -1 representa zonas con ausencia total de vegetación (p. Ej. ciudades, cuerpos de agua y roca expuesta).

Un aspecto importante que se debe de considerar es la condición de verdor observada en la vegetación ya que se aprecia según el NDVI calculado para el año 2000 un rango de 0 a 0.60 que abarca una superficie de 97.69% del área de estudio, condición que puede estar asociada a la presencia de una cobertura vegetal con pigmentación parda a verde en donde el valor cero no representa, en este caso, ausencia de vegetación ya que como se muestra en la figura 10 existe una considerable presencia de elementos arbustivos y arbóreos que pertenecen al ecosistema predominante de selva baja caducifolia.

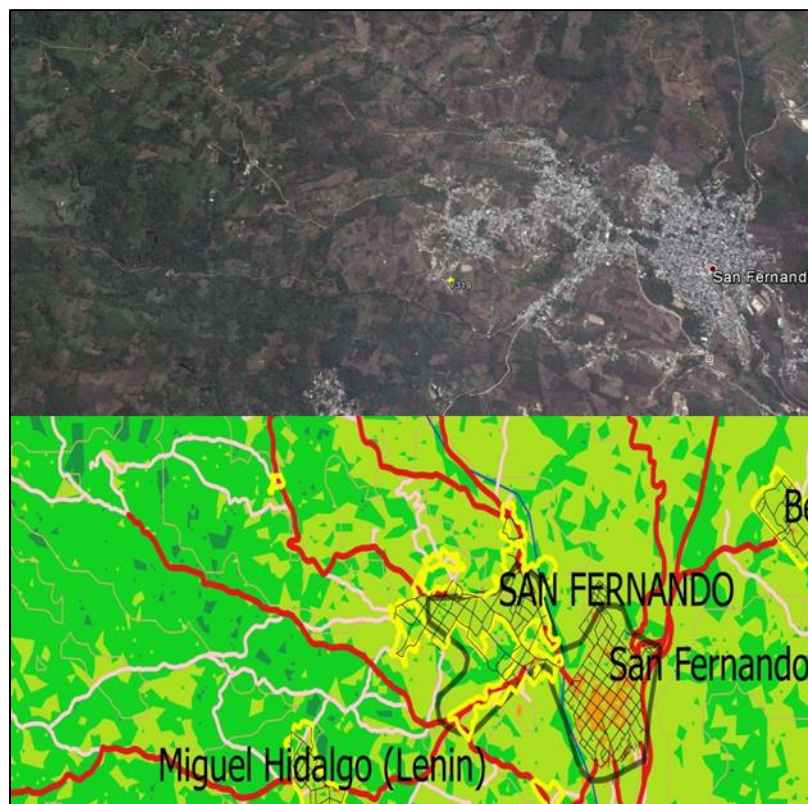


Figura 10. Contraste de la imagen de satélite con la del NDVI de una porción del ANP

Otro escenario que vale la pena tomar en cuenta es que el año 1998 se registró el mayor número de eventos de incendios en la historia reciente con grandes extensiones siniestradas (PACCCH, 2010) que pudieron haber afectado al área de estudio consumiendo buena parte de la vegetación nativa, la cual es poco probable que se haya recuperado en un plazo menor a dos años, lo cual se refleja en los rangos obtenidos del NDVI correspondiente al periodo estudiado.

Los años de 1997 y 1998 en el estado de Chiapas, se caracterizaron por ser años secos (*Ibid*), condición que generó la acumulación de materia vegetal muerta (combustible forestal) que condujo a un estado de alto de riesgo de incendios, provocando temperaturas altas y escasa o nula humedad en el suelo, situación que pudo haber condicionado un subdesarrollo de la vegetación con pigmentación predominantemente parda.

Con respecto a los resultados del NDVI para el mes de marzo del año 2016 se presenta la tabla 8.

Tabla 8. Rangos del NDVI del mes de marzo del año 2016

NDVI marzo 2016	Rango	Área (ha)	%
	-0.20 a 0	0.25223	0.00
	0 a 0.30	1298.488	6.18
	0.30 a 0.60	9777.5157	46.55
	0.60 a 0.90	9927.1437	47.26

Se observa que el rango del NDVI predominante oscila entre 0.30 y 0.90 abarcando una superficie del 93.81% del área de estudio, la cual se presenta en zonas con menor influencia antropogénica. Por el contrario, el resto del área oscila en un rango de -0.20 a

0.30 ubicándose en aquellas áreas donde se localizan centros de población e infraestructura urbana (carreteras y caminos).

En contraste con lo anterior, los rangos máximos del NDVI se presentan en aquellos sitios con presencia de vegetación la cual se puede diferenciar en pastizal, áreas de cultivo y zonas con arbolado según la imagen de satélite consultada; estos tipos de vegetación muestran una pigmentación notablemente verde, situación que estuvo favorecida por la presencia de patrones estándar precipitación durante los siete meses anteriores al mes en estudio, con base en los registros diarios de la estación San Fernando con clave 7319 (CONAGUA, 2016). Entonces, el verdor de la vegetación es consecuencia de la humedad presente en el suelo provocando que tanto las áreas de pastizales, cultivos y arbórea tengan pigmentos de color e intensidad similares que visualmente en el NDVI no se permita diferenciar a qué tipo de vegetación corresponde. Para este caso la extensión de la vegetación arbórea es menor en comparación a las de cultivos y pastizales, según otras imágenes de satélite consultadas.

Otro posible escenario es que la vegetación arbórea presente en el mes de marzo de 2016 hubiera estado constituida por especies de hojas anchas latifoliadas de coloración verde oscuro, lo cual haya permitido que el rango del NDVI se presente de 0.60 a 0.90. Este escenario puede ser el resultado de una posible pérdida de cobertura vegetal a causa de incendios que pudieron haberse presentado en el año 1998 y que 16 años después tras un proceso de sucesión ecológica secundaria haya recuperado ciertas características o cualidades estructurales diferentes al ambiente previo al supuesto siniestro.

Como parte de un ejercicio comparativo entre las condiciones de ambos años resulta interesante el hecho de que en el año 2000 el NDVI se presentó en un rango 0 a 0.60 en la

mayor superficie del área de estudio, comparado con el mismo mes en el año 2016 donde se observa un rango de 0.30 a 0.90. Se considera que este cambio puede estar relacionado con el verdor presentado en la vegetación y no necesariamente con el aumento de la cobertura de la misma.

Es necesario enfatizar que en el año 2000 se presentó una mayor superficie de cobertura vegetal arbórea comparado con el año 2016, con la diferencia que en el año 2000 tanto la vegetación arbórea como los pastizales se caracterizaron por poseer una pigmentación homogénea de color pardo lo cual refleja valores de NDVI bajos, mientras que en el año 2016 la pigmentación de ambos componentes vegetales se presentó en color verde pero la cobertura arbórea disminuyó notablemente en comparación con el año 2000, situación que pudo haber contribuido al aumento de las áreas de pastizales favorecidas, además, por la humedad presente en el suelo de este año representando así valores de NDVI altos.

Según los resultados obtenidos del NDVI haciendo referencia a los rangos más altos o mayores de cero, relacionados con la cobertura vegetal, ésta disminuyó del año 2000 al 2016 en un 3.88% dentro del área de estudio. Esta superficie fue transformada debido al establecimiento de nuevos centros de población y al aumento de la extensión de los ya establecidos (comparación de imágenes satelitales). Otra condición observada es el ligero aumento de superficies aisladas con componentes arbóreos en el año 2016 en comparación con el año 2000 especialmente en aquellos sitios donde no se evidencia que exista presencia de actividades humanas lo que significa que son zonas en buen estado de conservación.

Por el contrario, en las áreas de influencia de los centros de población y de infraestructura urbana se observa una disminución de las áreas arboladas y un incremento

de pastizales y áreas para diferentes fines de uso (cultivo, pecuario, caminos, entre otros), con base en lo que se observa en las imágenes de satélite.

A continuación se presentan las gráficas 11 y 12 que muestran las condiciones del NDVI en los dos diferentes años de estudio.

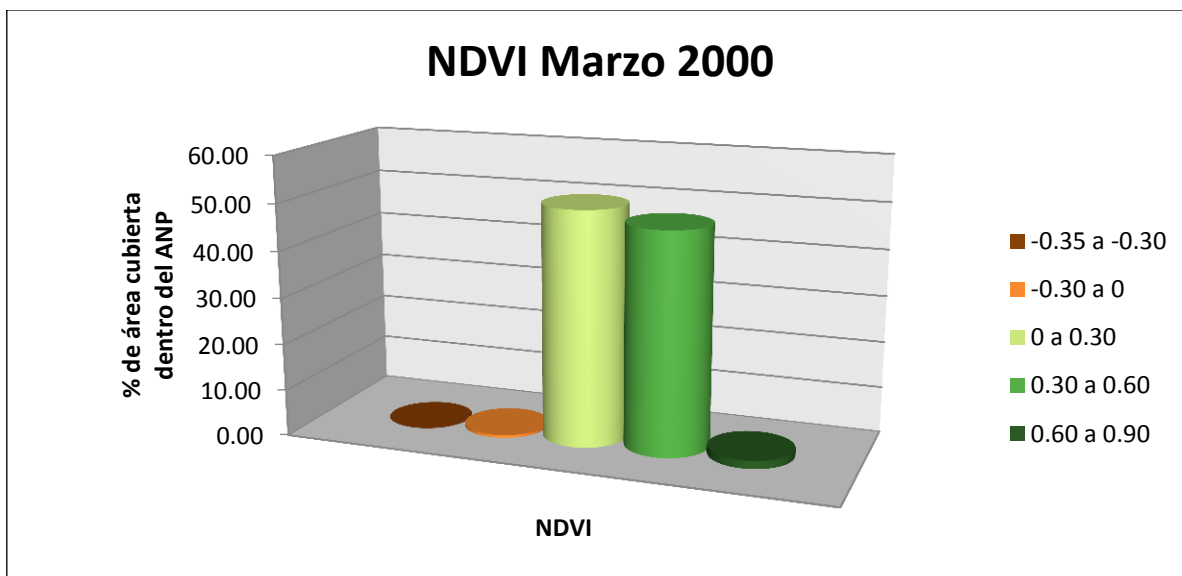


Figura 11. Gráfico de los rangos del NDVI en marzo del año 2000

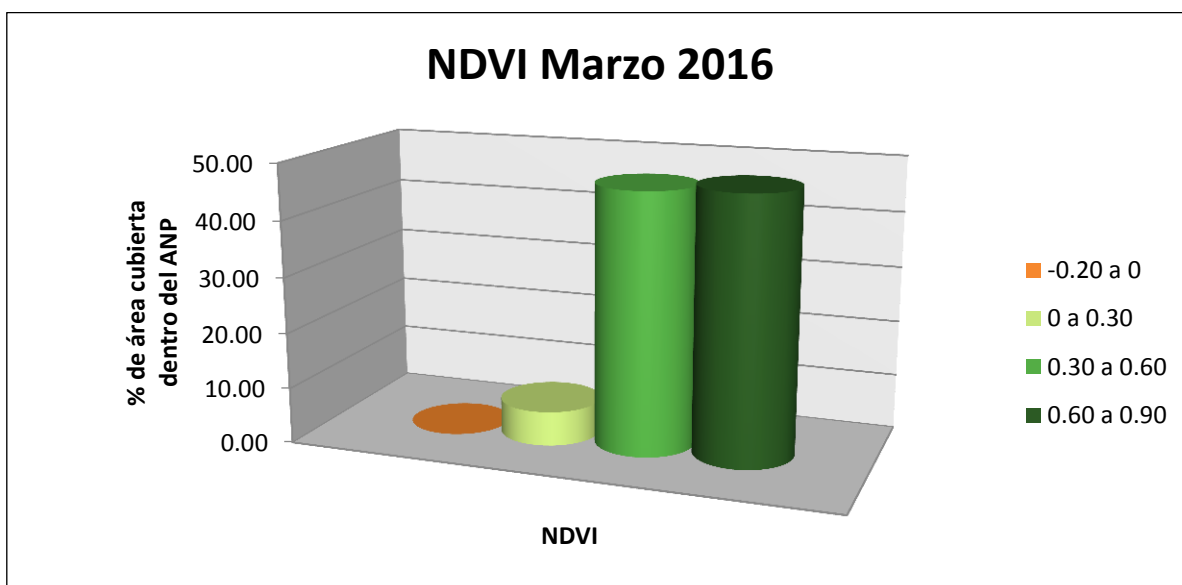


Figura 12. Gráfico de los rangos del NDVI en marzo del año 2016

Con respecto al segundo componente de análisis de este proyecto que corresponde a la TS se presenta la siguiente información:

Durante el mes de marzo del año 2000 el comportamiento de la TS oscila entre 30 y 40 °C en un 84.28% de la superficie total del área de estudio, mientras que en marzo del año 2016 dicho comportamiento oscila entre los 25 y 30°C cubriendo el 69.60%. En ambos años se visualizan los rangos más altos de temperatura en los centros poblacionales así como en las áreas aledañas a la infraestructura de servicios (carreteras y caminos), principalmente en la carretera que comunica a las ciudades de Tuxtla Gutiérrez con San Fernando.

Basándose en los resultados de la TS de marzo en el año 2000, se puede apreciar que la distribución de las temperaturas está en función de las condiciones físicas y ambientales propias del lugar, es decir, las temperaturas más altas se asocian a centros de población así como a las áreas desprovistas de vegetación ubicadas en la porción sur - sureste del polígono del área de estudio, además, el comportamiento de los patrones de la TS se encuentran muy dispersos en la totalidad del ANP asociándose a la condición de fragmentación de la vegetación. Lo anterior se puede entender como el modelo de distribución de temperaturas que se observa en función de los fragmentos de vegetación remanente, lo cual significa que a mayor vegetación menor TS y viceversa. En la tabla 9 se puede apreciar la distribución de los rangos de TS, el área que abarcan y el porcentaje respectivo.

Tabla 9. Rangos de temperatura superficial de marzo del año 2000

TS marzo 2000	Rangos	Área (ha)	%
	21.02 a 25	33.616021	0.16
	25 a 30	1237.9492	5.89
	30 a 35	8522.0949	40.57
	35 a 40	9181.5504	43.71
	40 a 45	1955.008	9.31
	45 a 50	64.87069	0.31
	50 a 55	8.310519	0.04

En este sentido fue importante llevar a cabo una correlación entre la TS y el NDVI con el objetivo de comprobar el planteamiento hipotético de este trabajo. Dado a lo anterior se comprobó que sí se presenta la correlación expuesta, es decir, las áreas con NDVI altos presentan valores de TS bajos y, por el contrario, los valores del NDVI bajos demuestran una TS alta. A Continuación se presenta la tabla 10 donde se relacionan los valores de NDVI con las TS.

Tabla 10. Relación del NDVI con la TS en el año 2000

AÑO 2000	
NDVI	Temperatura superficial (°C)
0.60 a 0.90	21 a 25
0.30 a 0.60	25 a 30
0.30 a 0.60	30 a 35
0 a 0.30	35 a 40
0 a 0.30	40 a 45
-0.30 a 0	45 a 50
-0.30 a 0	50 a 55

Sin embargo, los valores del NDVI no definen por completo el comportamiento de la TS, como se puede observar en los mapas 12 y 15 no todas las áreas con el mismo rango de NDVI mantienen el mismo rango de temperatura, puesto que puede estar asociada a los

diferentes tipos de vegetación presentes en el área y la cual repercute directamente en la emisividad adoptada por cada cuerpo vegetal y de la superficie en general. Esto significa, por ejemplo, que dentro del rango de 0 a 0.30 de NDVI puede existir tanto vegetación arbórea como pastizal influyendo directamente en el cambio del rango presentado en la TS para las mismas áreas, la cual puede tener influencia debido a la cantidad de energía térmica emitida por los cuerpos. Hay que advertir que la condición anteriormente descrita puede presentar excepciones que están directamente relacionadas con las cualidades del verdor en los diferentes tipos de plantas, es decir, para este caso el pastizal adoptó características muy similares de pigmentación que el componente arbóreo, hecho que reflejó un mismo rango de NDVI para ambos tipos de vegetación, y que al calcular la TS se obtuvieron diferentes rangos que están condicionados por el tipo de vegetación presente y su emisividad.

Tomando en consideración lo anterior es importante señalar que las áreas con pastizal tienden a presentar TS mayor en comparación con las áreas con vegetación arbórea, debido a que éstas presentan una mayor densidad foliar que contribuye a la regulación de la temperatura superficial. Esta condición evita que la radiación solar incida directamente en la superficie (suelo/roca) y como consecuencia existe una temperatura más estable y relativamente más baja que en aquellos lugares donde no existen árboles. Con esto se comprueba que aun existiendo áreas con el mismo rango de NDVI, los rangos de TS dentro de estas mismas áreas son variados de manera heterogénea.

Desde otro punto de análisis se identificó que la TS en la parte norte del polígono es menor que en las porciones centro y sur del mismo, puesto que puede estar condicionada a la altitud sobre el nivel del mar a la cual se encuentra, esto significa que a mayor altitud es

menor la temperatura ambiental que influye, a su vez, sobre la TS independientemente del tipo de vegetación que se encuentre. A continuación en la tabla 11 se presenta la relación que existe entre la altitud sobre el nivel del mar y los rangos de TS obtenidas dentro del área de estudio.

Tabla 11. Relación entre la TS y la altitud promedio en el año 2000

Año 2000	
TS (°C)	Altitud promedio (msnm)
21.02 a 25	1000
25 a 30	1015
30 a 35	1015
35 a 40	1014
40 a 45	914
45 a 50	900.00
50 a 55	900.00

Otra condición importante que se debe de considerar para acercarse a una interpretación más apegada a la realidad, tomando en cuenta los resultados obtenidos en este trabajo, se relaciona directamente con la época (estación) del año en el que se realizó el estudio, temporada que se caracteriza por presentar temperaturas elevadas y ausencia de lluvias propias del estiaje, lo cual limita que los ecosistemas expresen su máxima diversidad; un ejemplo de lo anterior puede ser la condición “seca” de la vegetación de la selva baja caducifolia en contraste con su faceta “viva” propia de la temporada de lluvias.

Con respecto al año 2016, al igual que lo sucedido en el año 2000, las condiciones de las temperaturas más altas se presentaron en los centros de población y en las vías de comunicación, así como en sus áreas aledañas, oscilando entre los 30 y 40 °C. Cabe mencionar que tanto TS mínimas como máximas se concentraron en zonas más puntuales.

Lo anterior significa que las TS altas se concentran en los sitios anteriormente mencionados, es decir, en áreas donde la vegetación ha sido sustituida por completo tanto por infraestructura urbana como por la apertura de nuevas áreas para la producción de bienes de consumo (p. Ej. madera, roca y alimentos) que, en última instancia, son las que tienen más impacto en la degradación de áreas silvestres. Esto se puede relacionar con el establecimiento y/o crecimiento de centros de población. Por otra parte, las TS con rangos de 25 a 30 °C se distribuyen de manera más homogénea en la mayor parte de la superficie del área de estudio, para ser más específicos en el 69.60% de la misma. Éste porcentaje se relaciona con sitios con presencia de vegetación incluidos pastizales y selva tropical con diferentes grados de desarrollo sucesional.

Continuando con esta descripción se observa que en un 4.5% del área de estudio la TS se encuentra un rango de 20 a 25°C, lo anterior puede estar relacionado directamente con la presencia de sitios bien conservados de selva tropical perennifolia según información generada por el INEGI en su carta de Uso de Suelo y Vegetación (2010). Esta estructura ecosistémica condiciona su emisividad la cual tiene una relación directa con la TS así como con el NDVI en virtud de que se caracteriza por presentar hojas verdes todo el año en más del 90% de los árboles presentes, además que guardan una densidad considerable que permite tener una influencia muy significativa en los dos parámetros en estudio. Debido a su densidad, así como al tamaño, color y forma de las hojas evitan que la incidencia de la energía solar penetre directamente al suelo, manteniendo un gradiente de temperaturas relativamente bajas en comparación con los demás sitios.

A continuación, en la tabla número 12, se muestran los rangos, área y el porcentaje que ocupa cada uno.

Tabla 12. Rangos de temperatura superficial de marzo del año 2016

TS marzo 2016	Rangos	Área (ha)	%
	20 a 25	944.61965	4.50
	25 a 30	14617.467	69.60
	30 a 35	5195.5761	24.74
	35 a 40	244.52254	1.16
	40 a 45	1.214236	0.01

Otro aspecto digno de tomar en cuenta es que las TS se presentan de templado a ligeramente cálido debido a un posible descenso de temperatura general, provocando que en los últimos dos años hayan permanecido temperaturas más bajas y como consecuencia mayor humedad, permitiendo que la vegetación se mantenga en mejores condiciones fenológicas.

En un análisis similar al realizado para el año 2000, también se identificó que las TS están condicionadas por la altitud sobre el nivel del mar a la cual se encuentran, lo que significa que a mayor altitud es menor la temperatura ambiental, misma que influye, a su vez, sobre la TS obtenida. En seguida se muestran en la tabla 13 la relación que existe entre la altitud sobre el nivel del mar y los rangos de TS dentro de la ZPFV Villa Allende.

Tabla 13. Relación entre la TS y la altitud promedio en el año 2016

Año 2016	
TS (°C)	Altitud promedio (msnm)
20 a 25	1104
25 a 30	1029
30 a 35	960
35 a 40	800
40 a 45	800

Finalmente, realizando una comparación de ambos años en la TS resulta muy interesante y necesario comprender por qué habiendo más vegetación en el año 2000 que en el año 2016, las TS en el año 2000 fueron más altas en un rango de 5 a 10 °C.

Recordando el planteamiento hipotético, donde se señala que a mayor vegetación menor TS los datos demuestran que esta condición no siempre se cumple. La razón es que la vegetación no debe generalizarse como si se tratara de un solo cuerpo vegetal, es decir, existe la necesidad de diferenciar vegetación arbórea, arbustiva y herbácea (pastizal), las cuales definen su emisividad y como resultado el comportamiento de los rangos de TS. Por este motivo los rangos de TS en el año 2000 se muestran de manera dispersa dentro del área de estudio, aparentemente asociada al grado de fragmentación presente en ese año.

Dicho lo anterior las TS calculadas en el mes de marzo del año 2000 son mayores que aquellas calculadas en marzo del año 2016 debido a que la vegetación en aquel entonces presentaba características de poco y deficiente desarrollo (plantas con hojas secas de coloración parda/amarillentas y con poco vigor) causado por una posible influencia de condiciones climáticas adversas (escasa o nula humedad en el suelo, sequía y temperaturas ambientales altas) situación que condicionó que las TS fueran altas.

Muy al contrario de lo que pasó en marzo del año 2000, en el año 2016 se presentaron condiciones climáticas más favorables que permitieron un mejor desarrollo y estado de salud en la vegetación, contribuyendo con esto a que la TS fuera significativamente menor. En la tabla 14 se muestra la relación que existe entre el NDVI y las TS presentadas en este año.

Tabla 14. Relación del NDVI con la TS en el año 2016

AÑO 2016	
NDVI	Temperatura superficial (°C)
0.60 a 0.90	20 a 25
0.60 a 0.90	25 a 30
0.30 a 0.60	30 a 35
0 a 0.30	35 a 40
-0.20 a 0	40 a 45

En la tabla anterior se interpreta que las áreas con NDVI se relacionan con valores de TS bajos y, por el contrario, los valores del NDVI bajos demuestran una TS alta.

A continuación en las figuras 13 y 14 se representan a través de gráficos los rangos en que se presentaron las TS en los años 2000 y 2016.

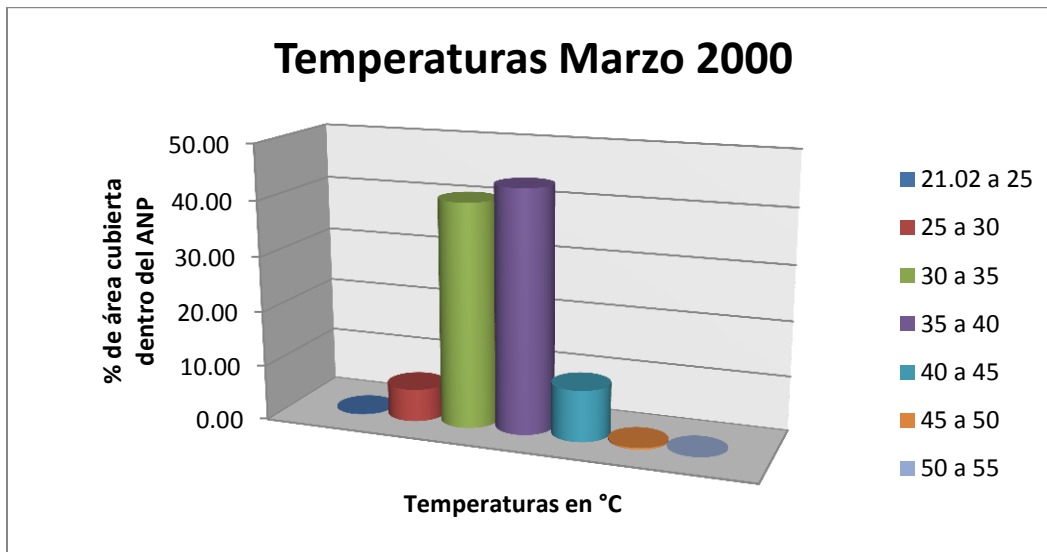


Figura 13. Gráfico de rangos de TS en marzo del año 2000

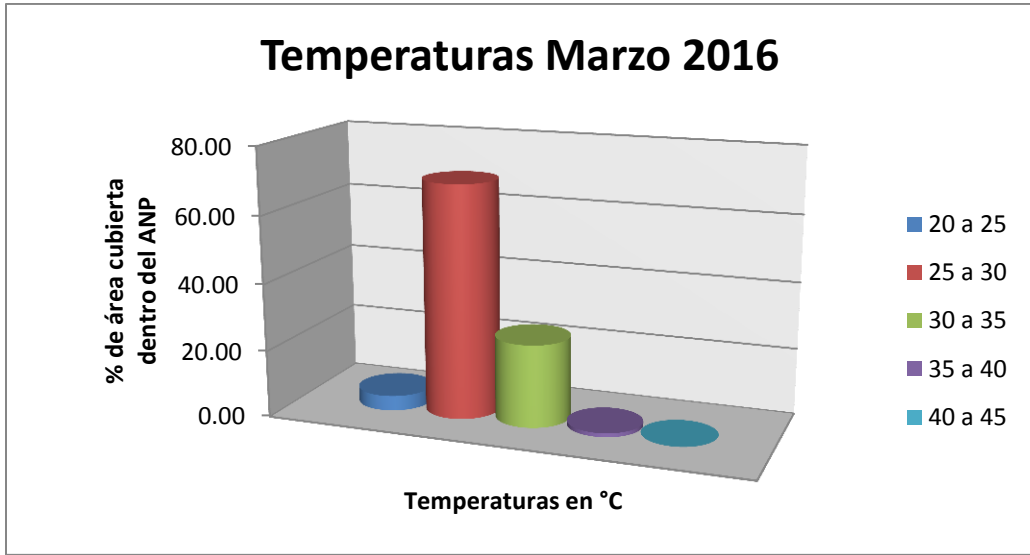


Figura 14. Gráfico de rangos de TS en marzo del año 2016

De acuerdo con la estación climática con clave 7319 ubicada en las afueras de la cabecera municipal de San Fernando, se registraron los siguientes datos referentes a la temperatura ambiental (ver figura 15).

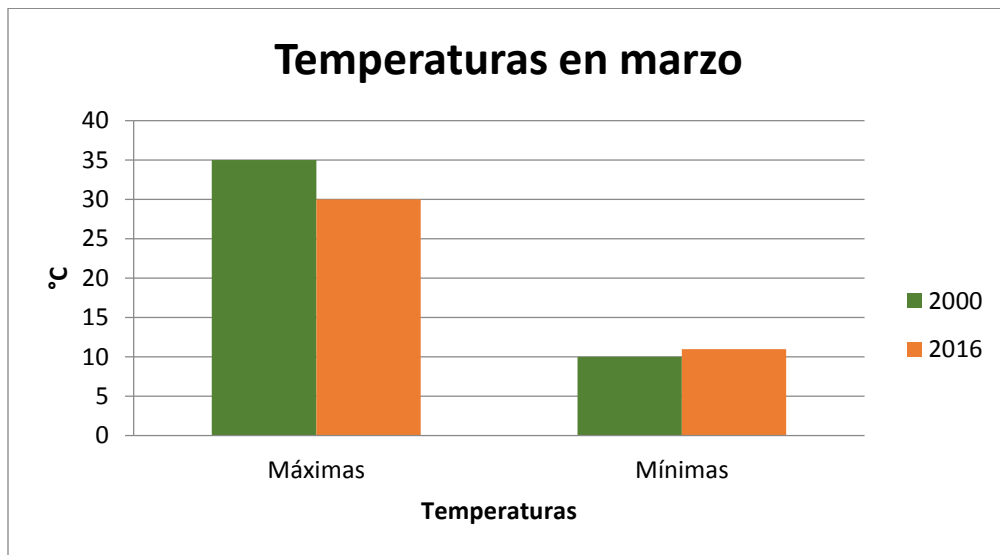


Figura 15. Temperatura ambiental registrada en marzo de los años 2000 y 2016
Fuente: CONAGUA, 2016

Como puede apreciarse en la figura 15 los registros de la temperatura ambiental pueden relacionarse con aquellos obtenidos para la TS, es decir, que a mayor temperatura ambiental se observa por lo general mayor TS y viceversa. Estos datos comprueban que la temperatura en general tanto ambiental como superficial fueron más altas en el año 2000 como resultado del fenómeno de El Niño presentado desde el año 1997 al 2000, el cual provocó fuertes sequías y aumento en la temperatura (PACCCH, 2010), condiciones que no se presentaron en el año 2016 donde se observaron temperaturas significativamente más bajas.

Los resultados de este trabajo relacionados con lo obtenido para el año 2000 coinciden con lo expuesto por Glantz en García, 2000 quién señaló que El Niño de 1997 – 1998 fue el más severo que se presentó durante un siglo comparado con los sucedidos en 1877 a 1878 y en 1982 a 1983. Continuando con el mismo autor, los registros señalan que durante el verano del 1997 se presentó una de las mayores sequías que ha experimentado el país, con decrementos cercanos al 50% de las lluvias y donde Chiapas no fue la excepción.

De acuerdo con los registros en 1997 y 1998 nuestra entidad presentó un número record de incendios forestales, llevando a condiciones de mayor temperatura y déficit de humedad en el suelo, así como de precipitación, lo que implicó una seria amenaza forestal hasta el año 2000 (PACCCH, 2010).

Tomando como base los resultados tanto de TS como de NDVI para los años estudiados en este trabajo y, de acuerdo con la nomenclatura técnica de islas de calor, se puede señalar que éste fenómeno se presenta en aquellos sitios relacionados con áreas desprovistas de vegetación con diferentes usos, centros de población e infraestructura asociada como carreteras y caminos, lo anterior se puede demostrar con la información

generada en los mapas 16, 26 y 27, donde las islas de calor están relacionadas directamente con aquellos sitios que presentan las condiciones anteriormente descritas y donde se registra una TS alta en comparación con el resto del área de estudio.

Cabe señalar que las islas de calor presentadas en el año 2000 son más extensas en comparación con las presentadas en el año 2016, lo cual puede asociarse directamente con las condiciones atmosféricas y ambientales adversas que prevalecieron durante el periodo 1997 hasta el año 2000. En el caso del año 2016 las islas de calor se presentaron más puntuales sobre aquellos sitios que están directamente relacionados con los centros de población donde la cobertura vegetal ha sido sustituida totalmente por áreas con diversos fines de uso, lo cual no está necesariamente asociado a condiciones atmosféricas adversas sino a las características presentes en la superficie.

Otros aspectos que determinaron la presencia y/o ausencia de las islas de calor se relacionan con las cuatro condiciones siguientes: 1) el estado de la vegetación arbórea, 2) el fenómeno de evapotranspiración asociada a la vegetación, 3) los materiales de los techos de las casas de cada poblado y 4) la escala de análisis del trabajo.

Con respecto al estado de la vegetación arbórea, en cada poblado se observa diferentes condiciones que pueden estar influyendo sobre la presencia de islas de calor, por ejemplo, en la mancha urbana de la cabecera municipal de San Fernando a pesar de ser el centro de población más grande en comparación con los demás, en el año 2016 no se presentaron islas de calor, debido a que existe una cantidad notablemente extensa de áreas con vegetación arbórea con especies perennifolias, tanto nativas como exóticas, tales como laurel de la India o benjamina (*Ficus benjamina*), chicozapote (*Manilkara zapota*), almendro (*Terminalia catappa*), guanacastle (*Enterolobium cyclocarpum*), ceiba (*Ceiba*

pentandra), mango (*Mangifera indica*), matilisguate (*Tabebuia rosea*), palo de brasil o brasileto (*Haematoxylon brasiletto*), flamboyán (*Delonix regia*), higo (*Ficus carica*), palma de coco (*Cocos nucifera*) y bambú (*Guadua aculeata*), entre otros. Cabe hacer mención que la mayoría de las especies exóticas arbóreas que se encuentran en diversos puntos de la vía pública cumplen con un propósito estético, pero que finalmente contribuyen a la regulación del microclima local. Adicionalmente a esto, cabe mencionar que la condición de la vegetación nativa incluyendo los elementos arbóreos en las áreas periurbanas se encuentra en buen estado de conservación, lo cual contribuye a mantener una temperatura favorable frente al fenómeno de islas de calor.

En los casos de los poblados más pequeños como por ejemplo Viva Cárdenas, Álvaro Obregón, Benito Juárez y 16 de septiembre se observa una ausencia casi total de elementos arbóreos tanto dentro como en los alrededores de los mismos, donde la vegetación nativa ha sido eliminada totalmente y/o sustituida por áreas de uso principalmente agropecuario y en algunos casos para fines acuícolas mediante la operación de estanques semi-rústicos para la producción de peces (ver los puntos de registro 6 y 15 del anexo fotográfico). Esta situación incrementa el grado de exposición de los rayos solares sobre la superficie, conduciendo a que estas áreas presenten tanto una mayor cantidad como una mayor extensión de islas de calor en comparación con San Fernando, debido a la condición expuesta en el párrafo anterior.

Como se mencionó anteriormente la cabecera municipal de San Fernando se encuentra rodeada por áreas que aún conservan atributos forestales nativos donde existe vegetación arbórea principalmente en la parte norte de aquélla, siendo una condición que favorece el proceso de evapotranspiración el cual, a su vez, contribuye al enfriamiento de la

atmósfera. Una situación contraria sucede en los demás centros de población del área de estudio, los cuales se encuentran rodeados por zonas perturbadas que se han convertido en áreas de cultivo o de pastoreo así como en espacios para el desarrollo de infraestructura urbana (carreteras e instalaciones de diferente naturaleza) donde la temperatura ambiental es relativamente alta debido a que no existe la suficiente evapotranspiración, lo cual se traduce en una temperatura ambiental elevada, además que las áreas de cultivo no generan la suficiente sombra como en el caso de la vegetación arbórea, lo que sí sucede en San Fernando, donde ésta permite amortiguar los efectos del aumento de la temperatura y mitiga la presencia de las islas de calor.

Otro de los aspectos tomados en cuenta es el relacionado con las características de los techos de las casas y de otras edificaciones. Al respecto es importante considerar que San Fernando es una población cuyos elementos de la infraestructura de este tipo cuentan con techos de teja de barro, de concreto, de lámina de asbesto y lámina de acero galvanizado, los cuales equilibran los valores generales de radiancia permitiendo así que este centro de población muestre valores más bajos que repercuten en la disminución de las TS obtenidas. En contraste con lo anterior, la mayoría de las casas de los poblados más pequeños tales como Viva Cárdenas y Álvaro Obregón cuentan con techos de lámina galvanizada, así como de concreto, generando una mayor radiancia que a su vez representa mayor TS, estas condiciones provocaron que en éstos se evidenciara con más claridad la presencia de las islas de calor.

En lo que respecta a la escala de análisis se puede argumentar que en la cabecera municipal de San Fernando no se observa con claridad las islas de calor a pesar de ser el centro de población más grande del área de estudio, debido a que la escala de trabajo es

muy pequeña dado que el objeto de estudio (ANP Villa Allende) es una superficie mayor a 21,000 ha. Lo anterior puede contraponerse con los resultados obtenidos en los centros de población más pequeños donde sí se observa con más claridad las islas de calor dentro de estos núcleos poblacionales; lo anterior puede ser resultado de que, como ya se indicó con anterioridad, estos lugares se encuentran inmersos en un mosaico de ambientes perturbados en donde el proceso de análisis considera a este mosaico como una unidad de espacio mayor que el correspondiente al área urbana de San Fernando, además de que ésta cuenta con vegetación arbórea bien desarrollada y que también se encuentra rodeada de áreas conservadas que dificultan la identificación de las islas de calor al interior de esta cabecera municipal.

A pesar de que el área de estudio es un ANP de carácter federal y con el decreto más antiguo en el estado de Chiapas, ha experimentado fuertes procesos de degradación y deforestación de la vegetación nativa. Estos cambios han sido propiciados principalmente por el establecimiento y el aumento de zonas habitacionales sobre todo en la porción sur de esta ANP como resultado de la expansión y la presión que ejerce la cercanía a la ciudad capital de Chiapas. Para la porción norte la situación no es tan distinta, salvo que el cambio de uso de suelo ha sido derivado de actividades agropecuarias, condición que pone en riesgo a los elementos originales del paisaje y con ello conducir a variaciones en el clima local. Como ejemplo de la presión que ejerce la cercanía de Tuxtla Gutiérrez, se observa el fenómeno de inmigración que se ha presentado principalmente en las poblaciones de Viva Cárdenas, 16 de septiembre, Álvaro Obregón y Benito Juárez, en donde existen pobladores avecindados provenientes, en la mayoría de los casos, de aquella ciudad con la intención de establecerse en estos lugares donde se presentan condiciones climáticas favorables que

aumentan el confort además de representar escenarios apacibles y cercanos a la ciudad capital del estado, lo cual ha conducido a que se establezcan fraccionamientos, así como quintas y ranchos, muchos de ellos con grandes extensiones en donde se desarrollan actividades ganaderas y agrícolas como el cultivo de mango, maíz y pastizales para uso forrajero, entre otros.

Considerando lo anterior, en el año 2016 no se presentaron islas de calor en la porción norte puesto que la degradación de la vegetación no ha sido tan intensa como en las porciones centro y sur en donde existe una mayor cantidad de infraestructura urbana la cual se relaciona directamente con el fenómeno social anteriormente mencionado.

Recapitulando lo antes expuesto, se puede decir que las islas de calor se presentan en centros urbanos o periurbanos en donde la vegetación nativa ha sido eliminada y/o sustituida totalmente por otros tipos de superficies o materiales (p. ej. concreto, asfalto, acero, aluminio, cristal, entre otros), por tal motivo, se puede argumentar que en la porción norte del polígono no existe infraestructura urbana significativamente extensa en donde pudiera presentarse el fenómeno de islas de calor, sino que en caso de registrarse temperaturas superficiales elevadas, se estaría tratando de algún otro fenómeno ambiental, el cual no necesariamente estaría asociado con áreas urbanas (p. ej. puntos de calor).

Por lo tanto, en ambos años las islas de calor se presentaron con patrones de distribución similares, en la mayoría de los casos relacionados con centros de población e infraestructura asociada.

V. CONCLUSIONES

Con base en lo obtenido en este trabajo se considera que es importante tomar en cuenta todos los factores posibles que podrían incidir en la interpretación de los resultados, de tal manera que se definieron las siguientes conclusiones:

- Las islas calor son condiciones ambientales que se presentan en todas las épocas del año. Las IC pueden verse incrementadas o disminuidas en cuanto a su intensidad y extensión de acuerdo con las condiciones atmosféricas que prevalezcan, por ejemplo, cuando se presentan frentes fríos y las temperaturas bajan se observan islas de calor con extensiones e intensidades menores en comparación con las que se puedan presentar cuando las temperaturas son elevadas.
- Las islas de calor presentadas en el año 2000 dependieron en gran medida de las condiciones atmosféricas registradas en ese entonces y no tanto por las características físicas propias de la superficie estudiada. Sin embargo, en el año 2016 las condiciones atmosféricas de la temporada se presentaron dentro de los parámetros estándar de tal forma que las islas de calor dependieron directamente de los centros de población e infraestructura asociada a éstos, además de otros factores tales como la altitud a la que aquéllas se encuentran. Por lo tanto, las islas de calor son multi-causales y solo pueden ser explicadas a través del análisis de diferentes datos socio-ambientales.
- Las islas de calor presentadas en el año 2000 fueron más extensas en comparación con las del año 2016. Lo anterior se debe a condiciones climáticas y ambientales anormales en el año 2000 que afectaron las temperaturas en general en todo el polígono de estudio.

- El fenómeno de inmigración que se ha venido presentando con mayor evidencia en los últimos años ha favorecido la apertura de áreas de producción para satisfacer las necesidades e intereses de la población humana, lo cual también ha favorecido el establecimiento de diferentes giros comerciales que ofertan diversos servicios como hoteles, restaurantes, talleres mecánicos, estéticas, tendejones, ferreterías y venta de materiales para la construcción, entre otros. Lo anterior ha generado una diversa gama de formas de ocupación del territorio, repercutiendo en la degradación de áreas silvestres que, de acuerdo con los resultados obtenidos, constituyen los sitios donde se presentan con mayor evidencia las islas de calor.

Considerando lo anterior el uso de suelo en el ANP, con base en la información de la CONANP (2016), el uso agropecuario tiene una superficie de 4,913.75 ha, el pastizal inducido cuenta con 2,229.87 ha, los asentamientos humanos abarcan una superficie de 1,439.39 ha y la vegetación secundaria ocupa una superficie de 1,060.90 ha. En este sentido el área total de espacios intervenidos cubre una superficie de 9,643.91 ha lo cual representa el 45.82% del ANP.

- Debido a las condiciones climáticas propias de la temporada de estiaje no se desarrollan actividades socioeconómicas relacionadas con la agricultura, por lo cual los suelos se encuentran desnudos y como consecuencia se registran temperaturas superficiales más elevadas, en contraste con las áreas que cuentan con cubierta vegetal arbórea.
- En este estudio las TS dependen principalmente de cuatro factores: la altitud, las condiciones atmosféricas, la hora de la toma de la imagen de satélite y las características propias de la superficie (cobertura vegetal e infraestructura

relacionada a centros de población), las cuales tienen una influencia directa en los resultados.

- El NDVI está relacionado directamente con la pigmentación verde de la vegetación y no con el área de la cobertura vegetal, puesto que se encontró que para el año 2000 existe mayor cobertura que en el año 2016, pero con la diferencia de que en el año 2000 la vegetación en general presentaba coloración parda y en el 2016 coloración verde, por lo tanto los rangos del NDVI positivo (presencia de vegetación) abarcaron mayor área en este año.
- La presencia de la vegetación en buen estado de conservación, especialmente del componente arbóreo tanto dentro como en los alrededores de la zona urbana de San Fernando, favorece el fenómeno de evapotranspiración y con ello al mantenimiento de valores altos de la humedad relativa, contribuyendo de esta manera al enfriamiento del aire circundante de la superficie terrestre, lo cual se traduce en la disminución de las islas de calor.
- La metodología que se utilizó toma como un factor determinante al NDVI el cual define en gran medida los valores de las TS y, como consecuencia, la intensidad y extensión de las islas de calor. Lo anterior significa que si la vegetación presenta una gama de verdor evidente o intenso, las TS suelen presentarse con valores bajos lo cual disminuye la intensidad y extensión de las islas de calor. La vegetación con pigmentación verde más intensa se asocia con coberturas arbóreas, siendo estas áreas las que suelen tener condiciones más frescas y con rangos de NDVI altos, lo cual da como resultado tanto intensidades como extensiones menores de las islas de calor.

VI. RECOMENDACIONES

Existen algunas consideraciones que permiten una mejor interpretación de los resultados que arrojen los SIG para los propósitos de este tipo de estudio, por tal motivo se presentan las siguientes recomendaciones:

- El análisis de la vegetación para el cálculo del NDVI debe de considerar la distinción de los diferentes modelos estructurales de la misma, es decir, se debe tomar en cuenta las características propias de los diferentes tipos de coberturas vegetales, debido a que cada uno de estos refleja de manera distinta la incidencia solar.
- Se debe tomar en cuenta la temporalidad en que se realiza el estudio ya que las diferentes formaciones forestales suelen presentar cambios adaptativos en su estructura dependiendo de la temporada del año así como de las condiciones atmosféricas prevalecientes que inciden directamente en la dinámica ambiental local (p. Ej. vegetación, temperaturas, humedad relativa y humedad del suelo).
- Con respecto a las acciones de mitigación de las islas de calor se podría considerar necesario promover y regular la fabricación y el uso reglamentarios de algunos compuestos o materiales que disminuyan la absorción del calor y aumente la permeabilidad del concreto, es decir, que éste sea de tonalidades más claras que permitan mayor reflectividad; así mismo que posean un alto grado de permeabilidad con lo cual se favorecería la infiltración del agua y la consecuente evapotranspiración, que son procesos que favorecen el enfriamiento del aire y con esto la disipación o disminución de las islas de calor. Complementando lo anterior, es muy importante que paralelamente se diseñen y ejecuten proyectos de arborización y revegetación

dentro de los centros urbanos y que se conserven en mejor estado las áreas y corredores verdes con el fin de que la vegetación ofrezca los servicios ecosistémicos relacionados, entre otros aspectos, con procesos de regulación del clima local.

- Considero que en la elaboración del Programa de Manejo de la ZPFV Villa Allende, siendo el instrumento rector de planeación y regulación de las actividades, acciones y lineamientos básicos para la gestión integral de las ANP's, se enfatice sobre la regulación del crecimiento de los centros de población ya existentes así como del establecimiento de nuevos núcleos poblacionales para evitar la extensión de las islas de calor, a la vez que se establezcan acciones de conservación y de restauración de los espacios silvestres que con base en sus condiciones ecosistémicas así lo requieran para mantener el conjunto de servicios ambientales que provee esta ANP. Así mismo, mediante la zonificación del ANP se deberá establecer los usos y niveles de usos permitidos, así como las restricciones y reglas necesarias para la regulación de las actividades económicas.
- Llevar a cabo un registro integral de los aspectos que representan los antecedentes del manejo de la ZPFV Villa Allende, teniendo en consideración que existen vacíos de información con respecto a diversos aspectos socio-ambientales, los cuales pueden limitar la generación de estudios posteriores que contribuyan al análisis y actualización del diagnóstico de esta ANP.
- Para llevar a cabo un análisis más preciso y detallado sobre las islas de calor dentro de las zonas urbanas, principalmente de San Fernando por ser la cabecera municipal, además de ser el centro de población más grande ubicado dentro del área de estudio, es necesario utilizar una escala mayor de trabajo que la empleada en el

presente proyecto, con el propósito de diferenciar las características de la superficie sujeta al análisis, de tal manera que el procedimiento para identificar islas de calor defina con claridad aquellos sitios donde se desarrolla este fenómeno con base en el tipo de los materiales así como en los rasgos de los elementos naturales, principalmente los que constituyen al componente arbóreo.

VII. BIBLIOGRAFÍA

- ALONSO, CARMELO., MORENO, VICTORIANO., RODRÍGUEZ, ELÍAS. (1999).
Determinación experimental de la firma espectral de la vegetación. Una sencilla
práctica de introducción a la teledetección. Teledetección. Avances y Aplicaciones,
Vol. 4, pp. 429-432.
- ARIZA, A. (2013). Descripción y corrección de productos Landsat 8 LDCM (Landsat Data
Continuity Mission). Instituto Geográfico Agustín Codazzi IGAC, 8-13.
- CARRERAS, C., MARÍN, M., MARTÍN VIDE, J., MORENO, M. d., & SABÍ, J. (1990).
Modificaciones térmicas en las ciudades. Avance sobre la isla de calor en
Barcelona. Documentos de análisis geográfica 17, pp. 51-77.
- CHANDER, G., MARKHAM, B.L., HELDER, D.L. (2009). Summary of current
radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO-1 ALI
sensors. ELSEVIER, Vol. 113 15 may 2009, pages 893 – 903.
- CHUVIECO, E. (1995). Fundamentos de teledetección espacial. Acalá, Madrid: ediciones
RIALP, S. A..
- COGLIATI, M. G. (2010). Estudio de la distribución espacial de la temperatura en el Valle
del Río Neuquén con la utilización de imágenes satelitales. Geograficando, 6 (6).
pp. 205-222.
- COGLIATI, M. G. (2011). Temperatura de superficie en el Valle del Río Neuquén
utilizando imágenes Landsat. Boletín geográfico. Año XXXII N°33. pp. 11-26.

- COMISIÓN NACIONAL DE ÁREAS NATURALES PROTEGIDAS – UNIVERSIDAD DE CIENCIAS Y ARTES DE CHIAPAS. (2014). Asesoría para la elaboración del programa de monitoreo biológico del Área de Protección de Recursos Naturales Villa Allende. Tuxtla Gutiérrez, Chiapas. pp. 104.
- CONANP. (2016). Estudio y análisis para determinar la categoría de Área Natural Protegida acorde a la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente. Zona Protectora Forestal Vedada, Los Terrenos Forestales de Villa Allende. México. CONANP.
- CÓRDOVA SÁEZ, K. (2011). Impactos de las islas térmicas o islas de calor urbano, en el ambiente y la salud humana. Análisis estacional comparativo: Caracas, octubre - 2009, marzo - 2010. Terra Nueva Etapa. pp. 95-122.
- CÓRDOVA SÁEZ, K. (2013). Geotecnología espacial aplicada a la reducción de la vulnerabilidad y el riesgo en el área urbana de Caracas-Venezuela. Terra Nueva Etapa. pp. 13-28.
- DOETZER ROSOT, M. A., da LUZ, J., CRUZ, P., & CARLOS ROSOT, N. y. (2008). Las geotecnologías como herramienta para el ordenamiento territorial: Estudio de caso en un bosque de Araucaria en el Sur de Brasil. Forestal Latinoamericana. pp. 111-130.
- DURÁN MARTÍNEZ, G., FORNET HERNÁNDEZ, E., & HIDALGO MAYO, A. (2010). Anomalías térmicas positivas y disminución de las lluvias en la comunidad de Guaro Holguín Cuba. Ciencias Holguín. pp. 1-10.
- FALLAS, J. (2003). Teledetección espacial. EDECA-PRMVS-UNA. pp. 5-9.

- FERNÁNDEZ MUERZA, A. (2009, 15 de abril). Ciudades, islas de calor. *Eroski Consumer*. Recuperado el 09 de diciembre de 2016, de http://www.consumer.es/web/es/medio_ambiente/urbano/2009/04/15/184664.php
- FERNÁNDEZ COPPEL, I. A., & HERRERO LLORENTE, E. (2001). EL SATELITE Landsat. Análisis visual de imágenes obtenidas del sensor ETM+ satélite Landsat. Universidad de Valladolid. pp. 4-10.
- FONTAL, B., SUÁREZ TRINO., REYES, M., BELLANDI, F., CONTRERAS, R., ROMERO, I. (2005). El espectro electromagnético y sus aplicaciones. Venezuela: Reproducción editorial. Diciembre 2005.
- GACETA PARLAMENTARIA, PARTIDO VERDE ECOLOGISTA DE MÉXICO. (2016). Iniciativa que reforma los artículos 56 y 57 de la Ley General de Desarrollo Forestal Sustentable, suscrita por integrantes del Grupo Parlamentario del PVEM. Número 4497-II. México.
- GARCÍA ACOSTA, V., DE LA PARRA ARELLANO, M. (2000). Gestión de riesgos de desastre ENSO en América Latina: México. CIECIAS MÉXICO, D.F. Septiembre del año 2000.
- GARCÍA CUETO, R., SANTILLÁN SOTO, N., & OJEDA BENÍTEZ, S. (2012). Balance radiativo y sus consecuencias en el comportamiento térmico en tiraderos municipales: estudio de caso en la ciudad de Mexicali, B. C., México. *Internacional de Contaminación Ambiental*. pp. 107-115.

- GÓMEZ FORERO, L. V. (2013). Estudio del crecimiento urbano con respecto al efecto isla de calor para establecer lineamientos de gestión energético ambiental en Bogotá. LACCEI', 1-5
- HERNÁNDEZ P., J. (2011). Procesamiento digital de imágenes. Apuntes de clases - JHP - GEP – UCHILE. pp. 3-38.
- HERNÁNDEZ P., J., & MONTANER F., D. (2009). Patrones de respuesta espectral. GEP, pp. 1-14.
- ITURBE, A., SÁNCHEZ, L., & CASTILLO, L., & Chías, L. (2009). Consideraciones conceptuales sobre los sistemas de información geográfica. Tlaxcala, México: Copyright.
- KOLB, M. (2013). Dinámica del uso del suelo y cambio climático en la planeación sistemática para la conservación: un caso de estudio en la cuenca Grijalva-Usumacinta. HAL, 5-15.
- LEY GENERAL DEL EQUILIBRIO ECOLÓGICO Y LA PROTECCIÓN AL AMBIENTE. (2016). Diario Oficial de la Federación. México. Reforma del 13 de mayo de 2016.
- MARTÍNEZ MONTOYA, J.F., HERRERO – ISERN, J., CASTERAD, M. A. (2014). Utilidad de la banda térmica de Landsat en la discriminación de terrenos yesosos. *Iturbide*, (73), pp. 1-8.
- MENESES TOVAR, C. L. (2011/2). El índice normalizado diferencial de la vegetación como indicador de la degradación del bosque. *Unasyuva*, 238. Vol. 62, 2011/2.

- OLAVE SOLAR, C., SANTANA, A., & BUTOROVIC, N. & ACUÑA, P.. (2008). Variabilidad térmica en la región Nororiental de la Península de Brunswick, Magallanes, Chile, empleando datos Landsat. *Anales Instituto Patagonia (Chile)*, 36 (2): 5-12.
- OLAYA, V. (2012). *Sistema de Información Geográfica*. Copyright: México.
- PACCCH. 2011. Gobierno del Estado de Chiapas, Conservación Internacional, Embajada Británica en México. Programa de Acción ante el Cambio Climático del Estado de Chiapas. <http://www.cambioclimaticochiapas.org/portal/descargas/paccch/paccch.pdf>. PHP. Noviembre de 2016.
- PÉREZ NAVARRO, A., BOTELLA PLANA, A., MUÑOZ BOLLAS, A., OLIVELLA GONZÁLEZ, R., CARLES, O. H., & RODRÍGUEZ LLORET, J. (2011). Introducción a los sistemas de información geográfica y geotelemática. *Dialnet*, (59), pp. 191-195.
- PINEDA JAIMES, N. B., BOSQUE SENDRA, J., GÓMEZ DELGADO, M., PLATA ROCHA, W. (2009). Análisis de cambio del uso del suelo en el Estado de México mediante sistemas de información geográfica y técnicas de regresión multivariantes. Una aproximación a los procesos de deforestación. *SciELO*, (69) : pp. 33-52.
- PRECIADO VARGAS, M., & ALDANA OLAVE, A. (2011). Análisis de presencia de islas de calor en Santiago de Cali empleando técnicas de teledetección. *Ventana informática* N° 24, pp. 95-114.

- RAMÍREZ SÁNCHEZ, H. U., & GARCÍA GUADALUPE, M. Y. (2013). Evaluación espacio-temporal de vegetación y uso de suelo de la cuenca Río Caliente, Jalisco, México. *Investigaciones geográficas*, pp. 43-55.
- ROSETE, F., & BOCCO, G. (2003). Los sistemas de información geográfica y la percepción remota. Herramientas integradas para los planes de manejo en comunidades forestales. *Gaceta ecológica*, pp. 43-54.
- RUÍZ, V., & SAVÉ, R. Y. (2013). Análisis multitemporal del cambio de uso del suelo, en el Paisaje Terrestre Protegido Mirafior Moropotente Nicaragua, 1993-2011. *Revista científica de ecología y medio ambiente*, pp. 117-123.
- SOBRINO J.A., JÍMENEZ – MUÑOZ, J.C., PAOLINI, L. (2004). Land Surface Temperature Retrieval From Landsat TM 5. *ELSEVIER*, (90), pp. 434-440.
- SOTO ESTRADA, E., & TRUJILLO URIBE, S. (2012). Estimación de temperatura superficial en el Valle de Aburrá mediante técnicas de percepción remota. Envigado, Antioquia: EIA, pp. 1 - 72.
- TRENBERTH, K. E., J. T. FASULLO Y J. KIEHL (2009). Earth's global energy budget. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 90, pp. 311-323.
- TRUCÍOS CACIANO, R., RIVERA GONZÁLEZ, M., DELGADO RAMÍREZ, G., & ESTRADA ÁVALOS, J., & CERRANO PAREDES, J.. (2013). Análisis sobre cambio de uso de suelo en dos escalas de trabajo. *Terra Latinoamerica*, pp. 339-346.
- TUMINI, I. (2011). Estrategias para reducción del efecto isla de calor en los espacios urbanos. Estudio aplicado al caso de Madrid. Madrid, España: GBC. pp. 1 – 15.

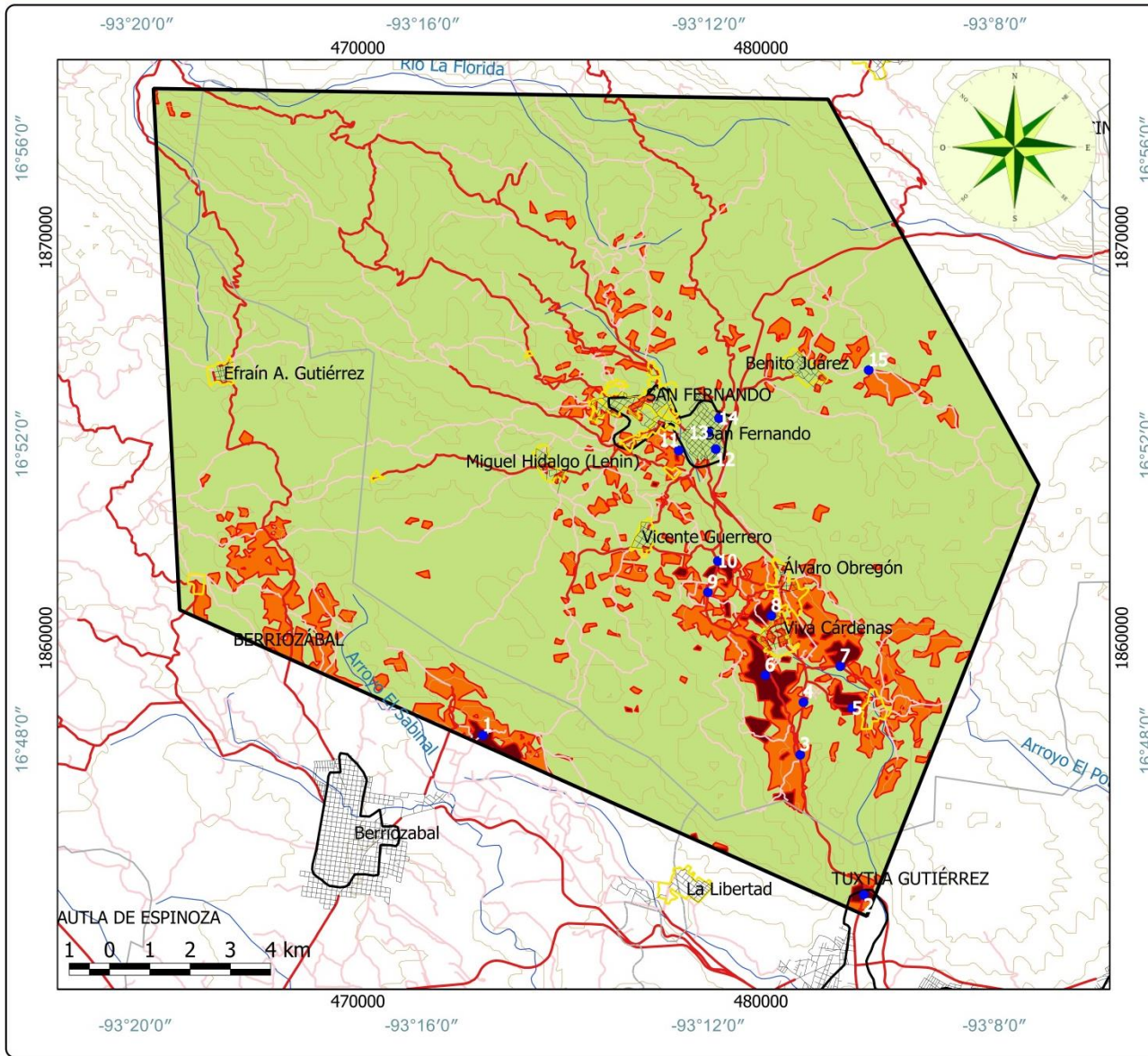
VIII. ANEXOS

VIII.1 UBICACIÓN DE LOS PUNTOS DE REFERENCIA FOTOGRÁFICA

En el presente anexo se muestran los diferentes puntos en los que se tomaron los registros fotográficos relacionados con las áreas en donde se localizaron las islas de calor tanto de marzo del año 2000 como de marzo del año 2016.

El registro cuenta con un total de quince puntos, los cuales fueron tomados en marzo del año 2017 y seleccionados con la finalidad de evidenciar las condiciones de las diferentes áreas, donde once de éstas presentan islas de calor y cuatro de ellos (12, 13, 14 y 15) son áreas en donde los resultados de este trabajo no demuestran la presencia de islas de calor, como es el caso de las porciones centro y este de la cabecera municipal de San Fernando, caracterizadas por la presencia de vegetación arbórea en buen estado de desarrollo.

MAPA DE UBICACIÓN DE LOS PUNTOS DE REFERENCIA DEL REGISTRO FOTOGRÁFICO ZONA PROTECTORA FORESTAL VEDADA, LOS TERRENOS FORESTALES DE VILLA ALLENDE



Simbología

Convencional

- Ríos
- Calles
- Caminos
- Carreteras
- Curvas de nivel
- Municipios
- Zonas rurales
- Zonas urbanas
- Cuerpos de agua
- ANP Villa Allende

Temática

- Puntos de verificación
- Islas de calor/ 2016
- Islas de calor/ 2000

Datos Cartográficos

Sistema de coordenadas: WGS 1984 UTM Zona 15 Norte
 Proyección: Universal Transversa de Mercator
 Cuadrícula: Cada 10000 m
 Gradícula: Cada 0° 04' 00"
 Datum: WGS84
 Elipsoide: WGS84
 Escala: 1:120,000

Fuente: INEGI
 CONANP
 CONAGUA

Instituto de Ciencias Básicas y Aplicadas

Centro de Investigación en Gestión de Riesgos y Cambio Climático

Lic. en Ciencias de la Tierra

Elaborado por:
 Yessica Cortés Pérez



VIII.2 REGISTRO FOTOGRÁFICO

Punto 1 ubicado en el municipio de Berriozábal



Las imágenes muestran que el sitio se encuentra desprovisto de vegetación nativa que ha sido sustituida por pastizales y áreas de cultivo que no están en producción debido a la temporada de estiaje. También se puede apreciar que son áreas en donde se comienza un proceso de urbanización.

Estas imágenes fueron tomadas en las coordenadas 16.816572 lat. N y -93.248381 long. W.

Punto 2 ubicado en la zona de la feria Chiapas (La Chacona), en el municipio de Tuxtla Gutiérrez



Estas áreas son destinadas al uso como estacionamiento público principalmente durante la celebración de la feria Chiapas, donde la mayor parte del suelo se encuentra totalmente desnudo. Se aprecia

también un conjunto de instalaciones con techos de lámina de acero galvanizado y de asbesto; además, es posible observar un área de almacenamiento de postes de concreto. Así mismo, es notable el mal estado en el que se encuentran los árboles de alineación.

Estas imágenes fueron tomadas en las coordenadas 16.7878 latitud norte y -93.1773 longitud oeste.

Punto 3 ubicado en la subestación eléctrica El Sabino de la CFE, en el municipio de San Fernando



En este punto, a ambos lados de la carretera, la vegetación ha sido removida para fines de construcción de infraestructura. Por un lado, las instalaciones de la CFE constan de una plataforma de concreto de grandes

dimensiones así como construcciones de apoyo con techos de lámina de acero galvanizado y, por otro lado, se aprecian áreas quemadas en las inmediaciones de este sitio.

Estas imágenes fueron tomadas en las coordenadas 16.8131 latitud norte y -93.1892 longitud oeste.

Punto 4 ubicado en el municipio de San Fernando



Este punto, por un lado, se presenta como una reserva ecológica y por otro lado, como un banco de extracción de materiales pétreos (grava), siendo evidente el alto nivel de degradación donde el suelo está totalmente expuesto. Se observan áreas

quemadas y pequeños fragmentos con pastizales. Cabe mencionar que esta área cubre una gran extensión en la cual se identificaron islas de calor en los dos años de estudio.

Estas imágenes fueron tomadas en las coordenadas 16.822600 lat. N y -93.188600 long. W.

Punto 5 ubicado en la comunidad 16 de septiembre, municipio de San Fernando



Estas áreas presentan pastizales secos con infraestructuras habitacionales en desarrollo, así mismo, al fondo de estos sitios se observan parcelas de cultivos en las cuales el suelo se encuentra desnudo.

Estas imágenes fueron tomadas en las coordenadas 16.821547 lat. N y -93.179485 long. W.

Punto 6 ubicado en la comunidad Viva Cárdenas, municipio de San Fernando



Se puede observar en este sitio el cambio de uso de suelo para fines agrícolas y para desarrollo habitacional, así como para la construcción de estanques semi-rústicos para piscicultura, también se puede presentar áreas con superficies rocosas

desprovistas de vegetación.

Estas imágenes fueron tomadas en las coordenadas 16.827458 lat. N y -93.195724 long. W.

Punto 7 ubicado del lado oriente de la comunidad Viva Cárdenas, municipio de San Fernando



En este sitio se encuentran áreas desprovistas de vegetación para uso ganadero, también se observan parcelas de cultivo, así como infraestructura habitacional (quintas).

Estas imágenes fueron tomadas en las coordenadas 16.829107 lat. N y -93.181731 long. W.

Punto 8 ubicado en el lado norte de la comunidad Viva Cárdenas, municipio de San Fernando



A través de estas imágenes se puede visualizar la condición que presenta esta área, la cual está caracterizada por suelos desnudos que muestran rasgos de vegetación quemada principalmente

pastizales, además de presentar muy poco arbolado e infraestructura habitacional en su mayoría con techos de lámina de acero galvanizado.

Estas imágenes fueron tomadas en las coordenadas 16.838200 lat. N y -93.194600 long. W.

Punto 9 ubicado en el camino vecinal que conduce de Viva Cárdenas a la cabecera municipal de San Fernando



En este punto se aprecia un uso agrícola para la producción de forraje; también es posible observar que en estos terrenos el suelo se encuentra desprovisto de vegetación herbácea y arbustiva con escasa presencia de árboles.

Estas imágenes fueron tomadas en las coordenadas 16.842438 lat. N y -93.206438 long. W.

Punto 10 ubicado en el camino vecinal que conduce de Viva Cárdenas a la cabecera municipal de San Fernando



Estas áreas presentan remoción de vegetación además de superficies con árboles secos y de poco desarrollo, al igual que los pastizales. También es posible observar áreas que han sido quemadas las cuales puedan deberse por la construcción

de infraestructura habitacional o bien para uso agrícola, además de esto, se observan áreas rocosas y suelos totalmente descubiertos principalmente en las laderas de las montañas. Estas imágenes fueron tomadas en las coordenadas 16.848085 lat. N y -93.204575 long. W.

Punto 11 ubicado en la periferia del lado sur de la cabecera municipal de San Fernando



Desde este punto se aprecian dos perspectivas totalmente diferentes puesto que en los resultados del presente trabajo se observan islas de calor del lado suroeste y, por el contrario, del lado sureste no se identificó dicho fenómeno. En estas imágenes se visualiza el contraste que existe entre ambos lados de la carretera, lo anterior quiere decir que, por un lado, la porción sureste presenta vegetación principalmente arbórea bien desarrollada, la cual se encuentra distribuida entre el área urbana, y por otro lado, del lado suroeste la vegetación es escasa con árboles poco desarrollados, pequeños y sin follaje, además de presentar sitios donde el suelo se encuentra totalmente desprovisto de vegetación. Estas imágenes fueron tomadas en las coordenadas 16.868043 latitud norte y -93.211922 longitud oeste.

Punto 12 ubicado en la entrada principal de la cabecera municipal de San Fernando



Se puede observar a través de estas imágenes la condición en buen estado y desarrollo del arbolado dentro del área urbana de San Fernando, además que se encuentra distribuido homogéneamente.

Cabe mencionar que muchos de estos árboles tienen grandes dimensiones, lo cual proporciona áreas de sombra que permiten la regulación de la temperatura local. Es probable que debido a tales condiciones, no se identificaran islas de calor dentro de esta porción del área urbana. Estas imágenes fueron tomadas en las coordenadas 16.868300 latitud norte y -93.205000 longitud oeste.

Punto 13 ubicado en el parque central de la cabecera municipal de San Fernando



Se aprecia en estas imágenes la presencia de extensas áreas de árboles grandes, frondosos y de follaje color verde oscuro.

A pesar de ser la cabecera municipal de San Fernando, ésta no cuenta

con el esquema de urbanización utilizado en las grandes ciudades, lo cual permite que los habitantes de este lugar dispongan de espacios muy grandes para la ocupación de patios de casas habitacionales que presentan árboles de gran tamaño que ofrecen sombra y frutos, como es el caso del mango. Estas imágenes fueron tomadas en las coordenadas 16.871300 lat. N y -93.206400 long. W.

Punto 14 ubicado en la porción noreste de la cabecera municipal de San Fernando



Dada la ubicación del sitio en que se tomaron estas imágenes, es posible apreciar la mayor parte de la cabecera municipal de San Fernando en donde es evidente observar la presencia de árboles

de gran tamaño y bien desarrollados, los cuales se encuentran distribuidos dentro de esta área, así mismo, cabe mencionar que existen sitios con macizos forestales. Además de esto, en la periferia del lado norte de la cabecera, también se aprecia la presencia de áreas forestales nativas del lugar con características propias que denotan una estructura diferente a las ubicadas dentro de la ciudad. Estas imágenes fueron tomadas en las coordenadas 16.873900 lat. N y -93.204400 long. W.

Punto 15 ubicado al lado este de la comunidad Benito Juárez, municipio de San Fernando



Se puede observar en estas imágenes áreas con presencia de pastizales para uso ganadero, áreas rocosas y un estanque semi-rústico para piscicultura, así mismo se localizan en las inmediaciones áreas con vegetación en buen estado de desarrollo.

Estas imágenes fueron tomadas en las coordenadas 16.882600 lat. N y -93.176500 long. W.

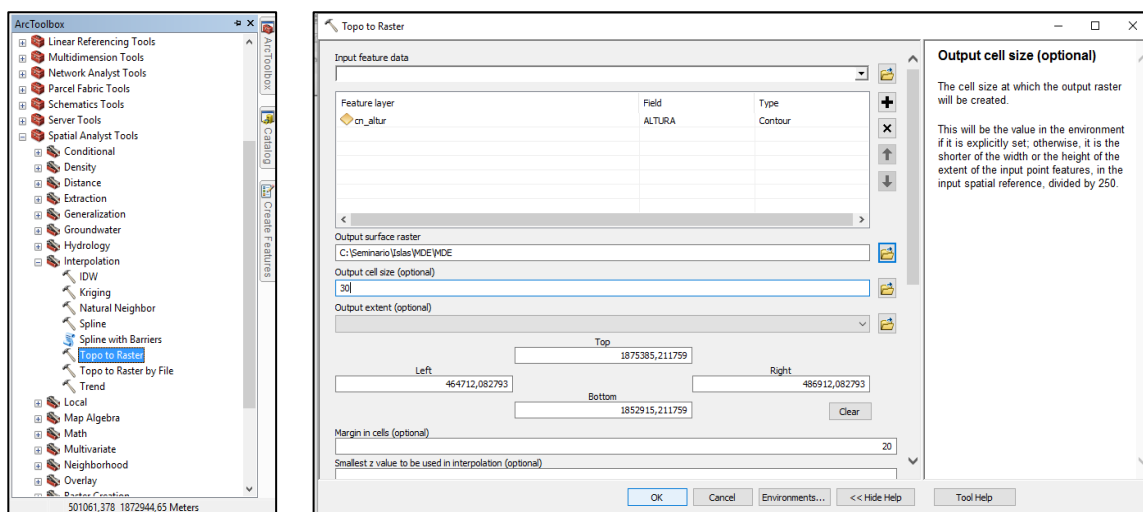
VIII.3 MANUAL DEL PROCEDIMIENTO METODOLÓGICO

1. Procedimiento general para la creación del Modelo Digital de Elevación (MDE) en Arc Gis 10.3

- Cargar curvas de nivel (*cn_altur*)

Dirección: Arc Toolbox >> Spatial Analyst Tools >> Interpolation >> Topo to raster >> Ok

- Input feature data. Cargar la capa de curvas de nivel (*cn_altur*)
- Field. Campo altura
- Output Surface raster. Direccionar y nombrar la capa de salida (*TopoRaster*)
- Output cell size (optional). 30
- Ok

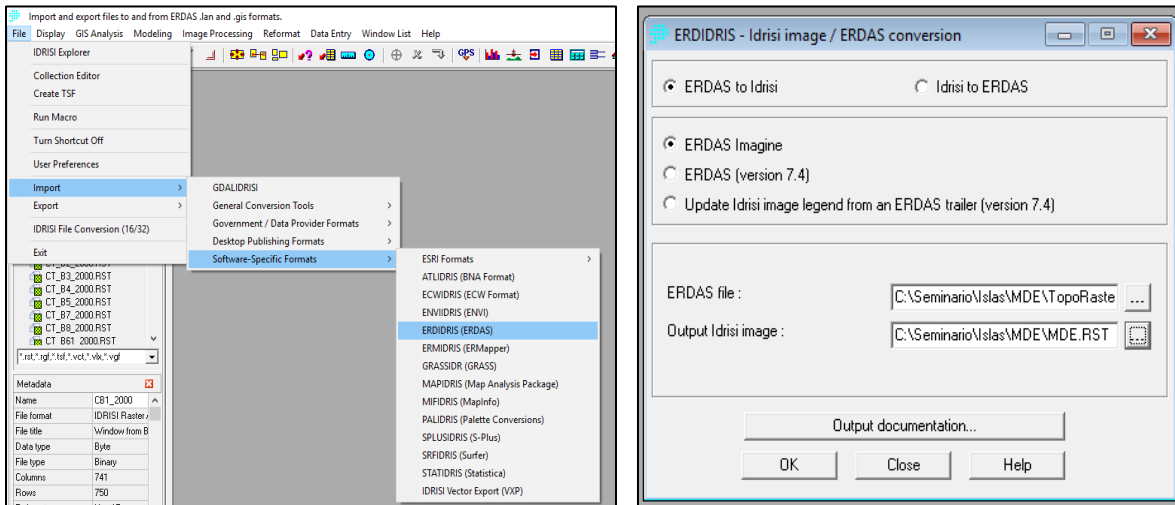


2. ¿Cómo cargar el MDE en TerrSet?

Dirección: File >> Import >> Software – Specific Formats >> ERDIDRIS (ERDAS)

- Seleccionar casilla. ERDAS to Idrisi
- Casilla. ERDAS Imagine

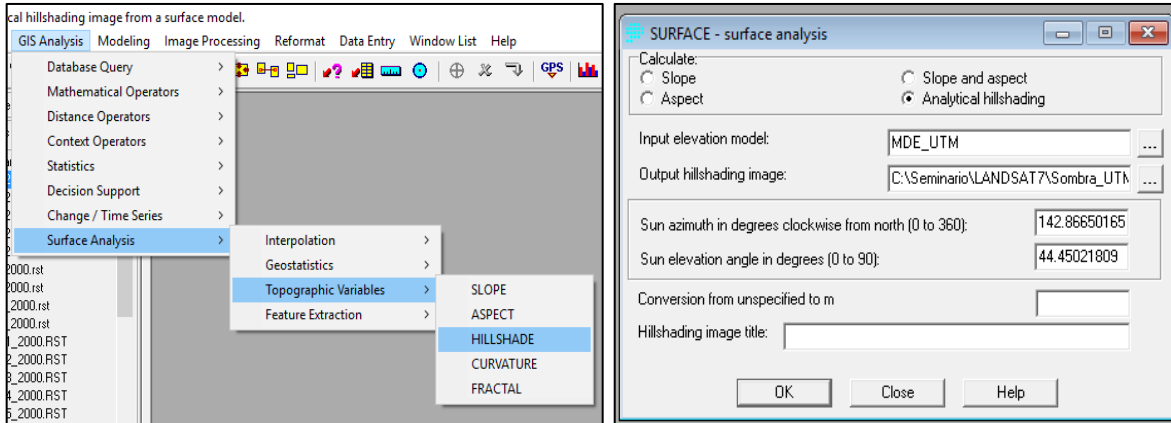
- ERDAS file. Cargar la capa (*TopoRaster*)
- Output Idrisi image. Direcccionar y nombrar la capa de salida (*MDE*)



3. Creación del modelo de sombra en TerrSet

Dirección: GIS Analysis >> Surface Analysis >> Topographic variables >> Hillshade

- Seleccionar casilla. Analytical hillshading
- Input elevation model. Cargar la capa del *MDE*
- Output hillshading image. Direcccionar y nombrar la capa de salida (*Sombra*)
- Sun azimuth in degrees clockwise from north (0 to 360). *116.18563944*
- Sun elevation angle in degrees (0 to 90). *58.81957383*
- Ok

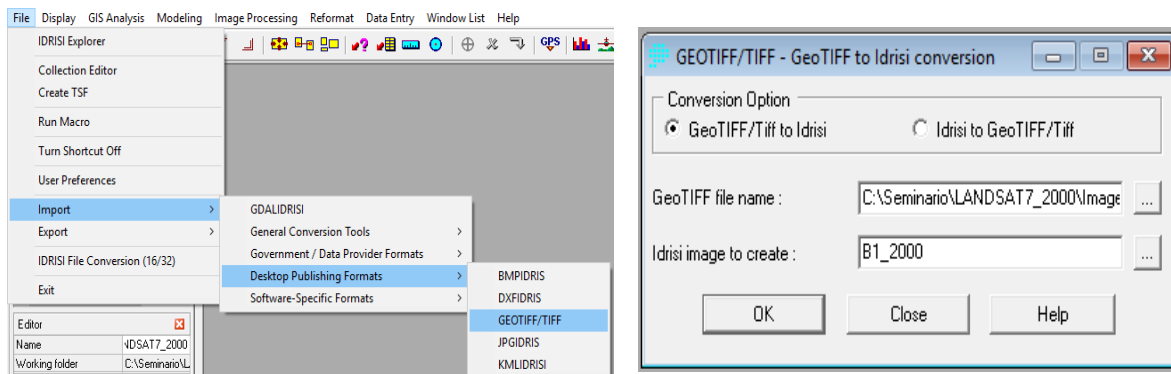


Nota. Sun azimuth y sun elevation son valores obtenidos del metadato de las imágenes Landsat.

4. Importación de imágenes satelitales en TerrSet

Dirección: Fill >> Import >> Desktop publishing Formats >> GEOTIFF/TIFF

- Seleccionar casilla. GeoTIFF/Tiff to Idrisi
- GeoTIFF file name. Cargar la imagen de la banda en formato (.Tif)
- Idrisi image to create. Direccionar y nombrar la capa de salida
- Ok

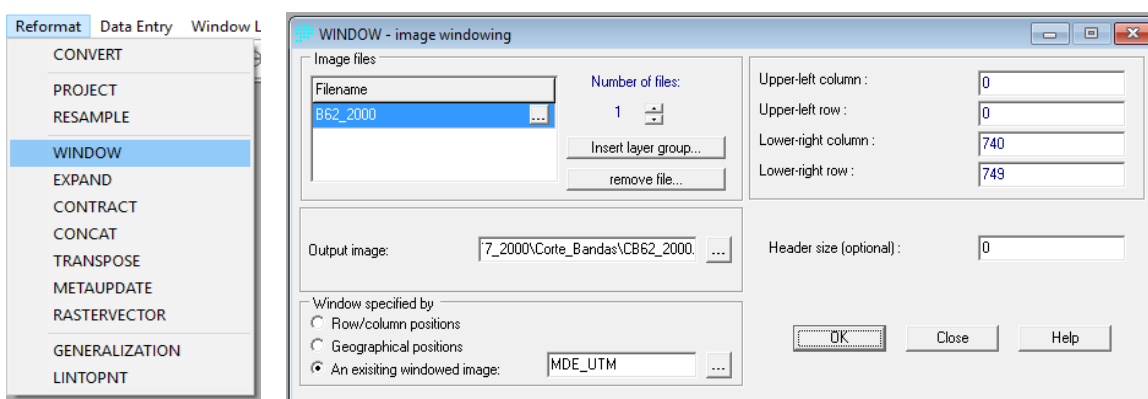


Nota. Realizar este proceso para cada una de las bandas.

5. Corte de las bandas a tamaño MDE en TerrSet

Dirección: Reformat >> Window

- Filename. Cargar banda a cortar
- Output image. Direccionar y nombrar la capa de salida (*CB_2000*)
- Clic en >> An existing windowed image. Cargar *MDE*
- Ok



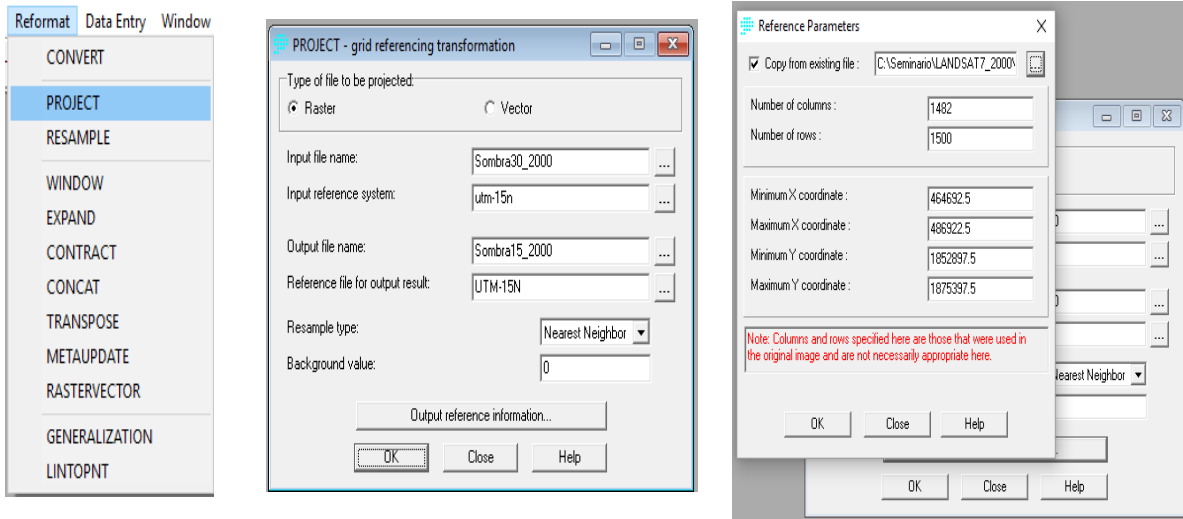
Nota. Realizar este proceso para cada una de las bandas.

6. Re-proyección en TerrSet


Dirección: Reformat >> Project

- Seleccionar la casilla. Raster
- Input file name. Cargar la capa a reproyectar
- Input reference system. Seleccionar el sistema de referencia
- Output file name. Direccionar y nombrar la capa de salida
- Reference file for output result. Seleccionar el sistema de referencia (UTM-15N)

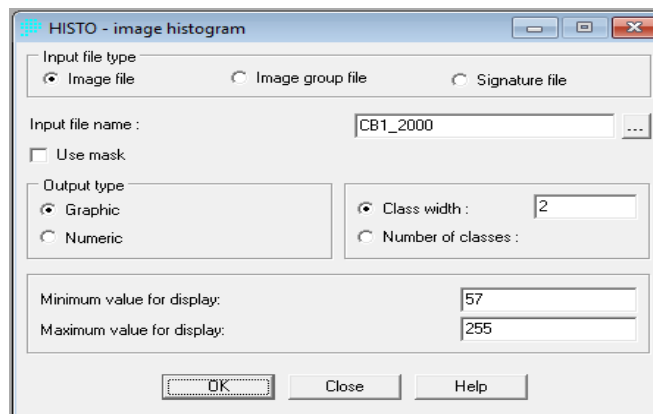
- Output reference information... >> seleccionar casilla “Copy from existing file” >> cargar capa de referencia (Banda) >> Ok
- Ok



7. Histograma de las imágenes en TerrSet

Dirección: Clic en el ícono Histogram  Display

- Seleccionar la casilla. Image file
- Input file name. Cargar la banda deseada
- Ok

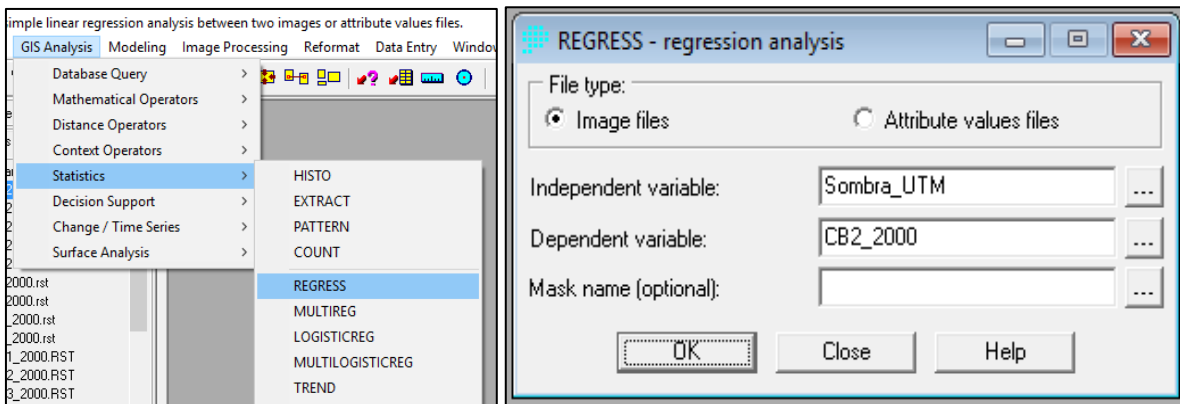


Nota. Realizar este proceso para cada una de las bandas.

8. Regresión lineal en TerrSet

Dirección: GIS Analysis >> Statistic >> Regress

- File type. Image files
- Independent variable. Cargar la capa del modelo de sombra
- Dependent variable. Cargar la banda deseada
- Ok



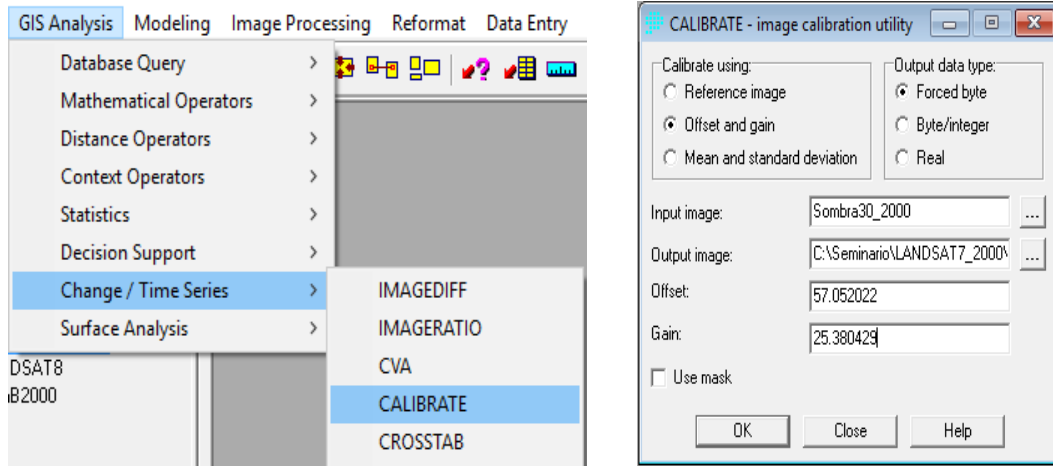
Nota. Realizar este proceso para cada una de las bandas.

9. Calibración de imágenes en TerrSet

Dirección: GIS Analysis >> Change/Time Series >> Calibrate


- Seleccionar la casilla. Offset and gain
- Input image. Cargar la capa del modelo de sombra
- Output image. Direccionar y nombrar la capa de salida (*Cal_B*)
- Offset. Agregar el valor que corresponde a “Y” de la ecuación obtenida de la regresión lineal

- Gain. Agregar el valor que corresponde a “X” de la ecuación obtenida de la regresión lineal
- Ok

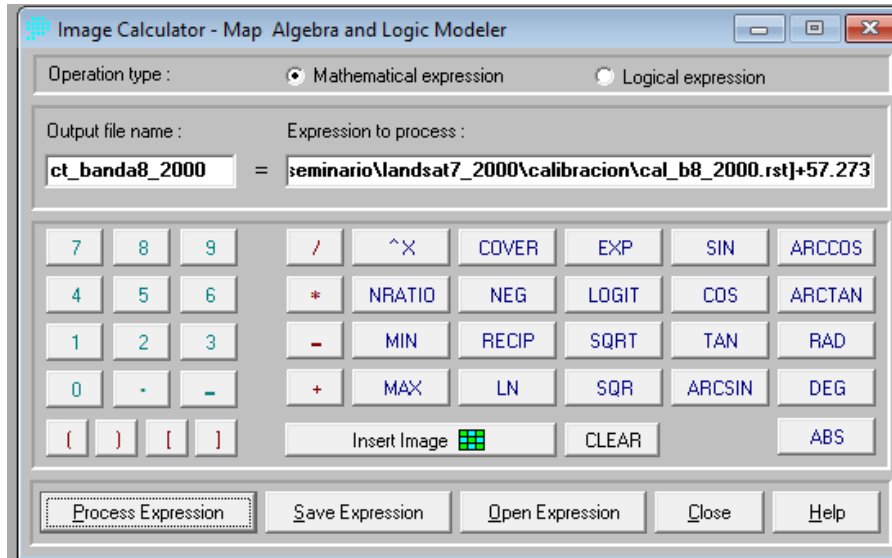


Nota. Realizar este proceso para cada una de las bandas, los valores de “X” y “Y” son diferentes para cada banda (obtenidos del proceso de la regresión lineal)

10. Corrección Topográfica en TerrSet

Dirección: Clic en el ícono Image Calculator 

- Seleccionar la casilla. Mathematical expression
- Output file name. Nombrar la capa de salida (*CT_B*)
- Expression to process. Insertar las siguientes capas: (*banda cortada*) – (*imagen calibrada*) + (*Valor medio*)
- Clic en el botón. Process Expression

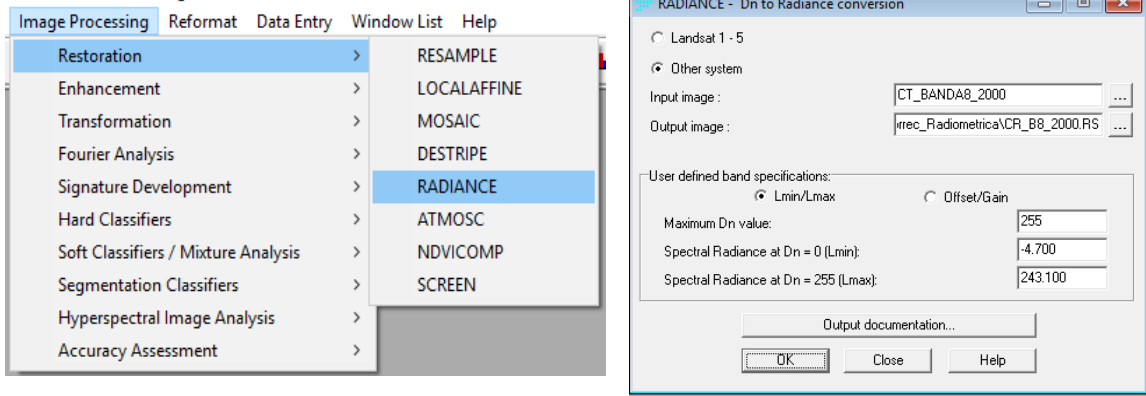


Nota. El valor medio se obtiene de los resultados arrojado en el histograma, realizar este proceso para cada una de las bandas.

11. Corrección Radiométrica en TerrSet

Dirección: Image Processing >> Restoration >> Radiance

- Seleccionar la casilla. Other system
- Input image. Cargar la banda con corrección topográfica (*CT_B*)
- Output image. Direccional y nombrar la capa de salida (*CR_B*)
- User defined band specifications. Seleccionar casilla: Lmin/Lmax
- Maximum Dn value. 255
- Spectral Radiance at $D_n = 0$ (*Lmin*). Agregar el valor mínimo que corresponde a la radiancia de la banda
- Spectral Radiance at $D_n = 255$ (*Lmax*). Agregar el valor máximo que corresponde a la radiancia de la banda
- Ok

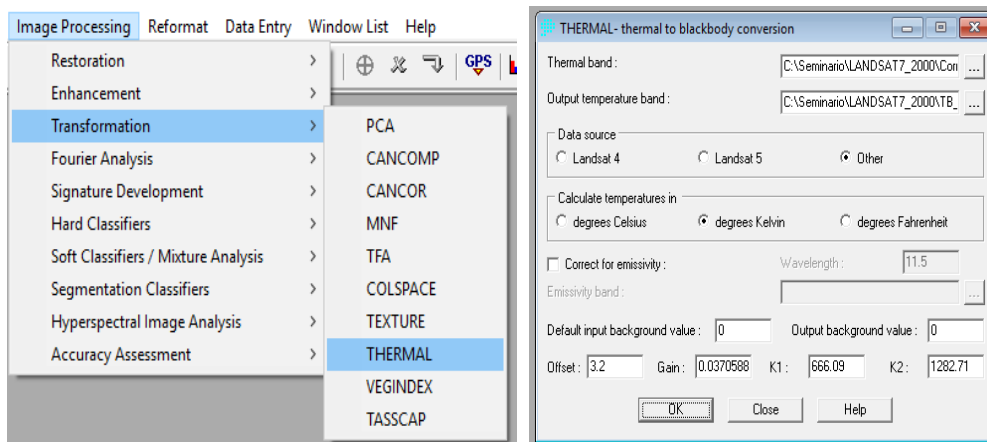


Nota. El valor de la radiancia (Lmin y Lmax) viene contenida en el metadato de la imagen (banda), realizar este proceso para cada una de las bandas.

12. Cálculo de temperatura brillo en TerrSet

Dirección: Image Processing >> Transformation >> Thermal

- Thermal band. Cargar la banda con corrección radiométrica (*CR_B*)
- Output temperature band. Direccionar y nombrar la capa de salida (*TB_B*)
- Data source. Seleccionar la casilla: Other
- Calculate temperatures in. seleccionar la casilla: degrees kelvin
- Ok

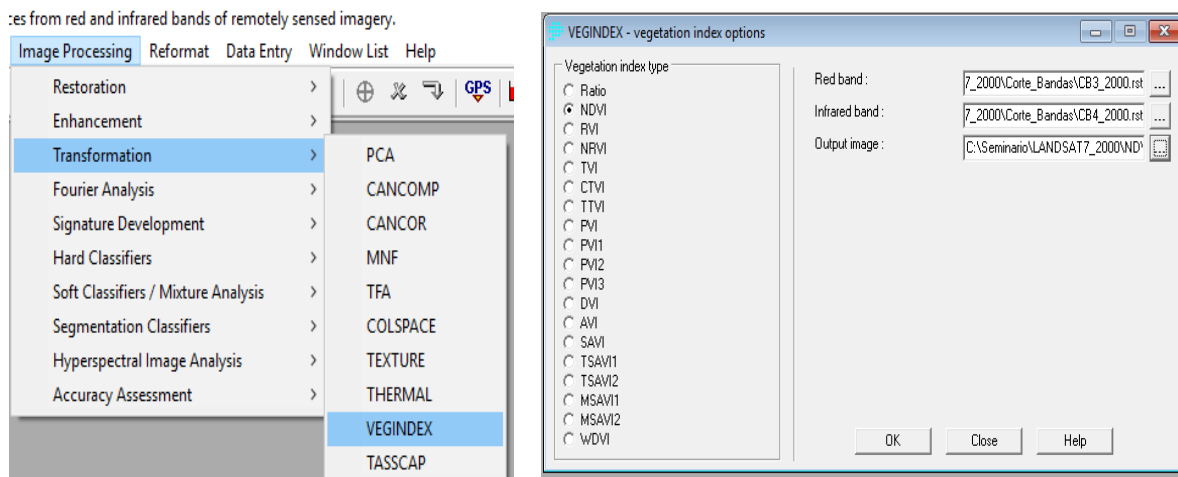


Nota. Calcular la temperatura brillo solo para la banda 6.1.


13. Cálculo del NDVI en TerrSet

Dirección: Image Processing >> Transformation >> VEGINDEX

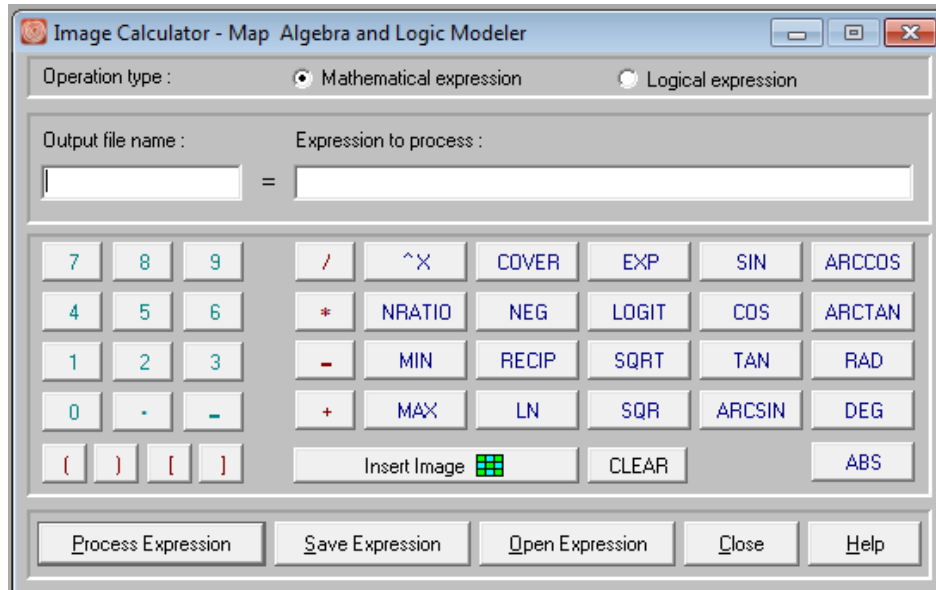
- Vegetation index type. Seleccionar la casilla NDVI
- Red band. Cargar *banda 3*
- Infrared band. Cargar *banda 4*
- Output image. Direccionar y nombrar la capa de salida (*NDVI*)
- Ok



14. Cálculo de emisividad y temperatura superficial en TerrSet

Dirección: Clic en el ícono Image Calculator 

- Seleccionar la casilla. Mathematical expression
- Output file name. Nombrar la capa de salida
- Expression to process. Insertar las capas (capas de acuerdo con el cálculo)
- Clic en el botón. Process Expression



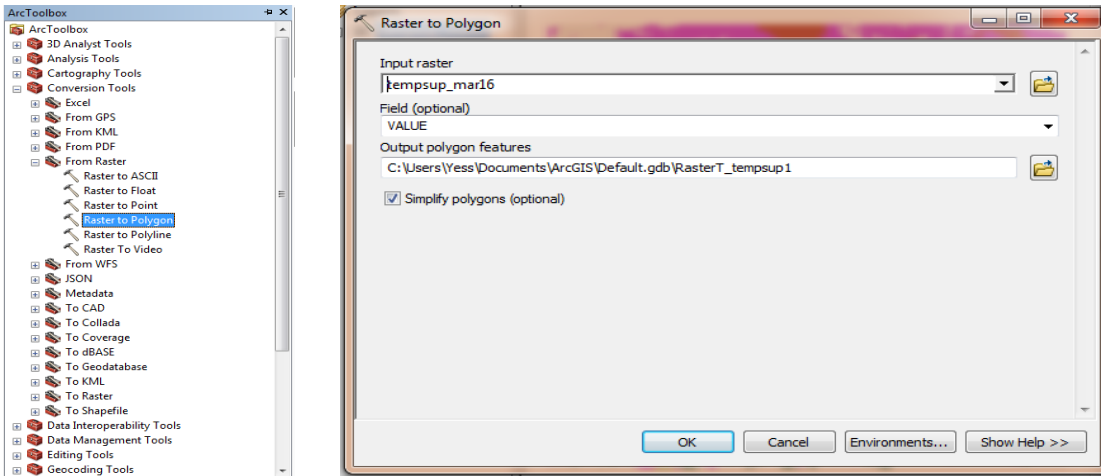
Nota. Utilizar esta herramienta y aplicar las fórmulas de acuerdo con la metodología.

15. Extracción de islas de calor en Arc Gis 10.3

- Cargar capa de temperatura superficial
 - a. Conversión de formato raster a formato vector

Dirección: Arc Toolbox >> Conversion Tools >> From Raster >> Raster to Polygon >> Ok

- Input raster. Cargar la capa de temperatura superficial
- Field (optional). Rango
- Output polygon features. Direccionar y nombrar la capa de salida (*TS_V*)
- Ok

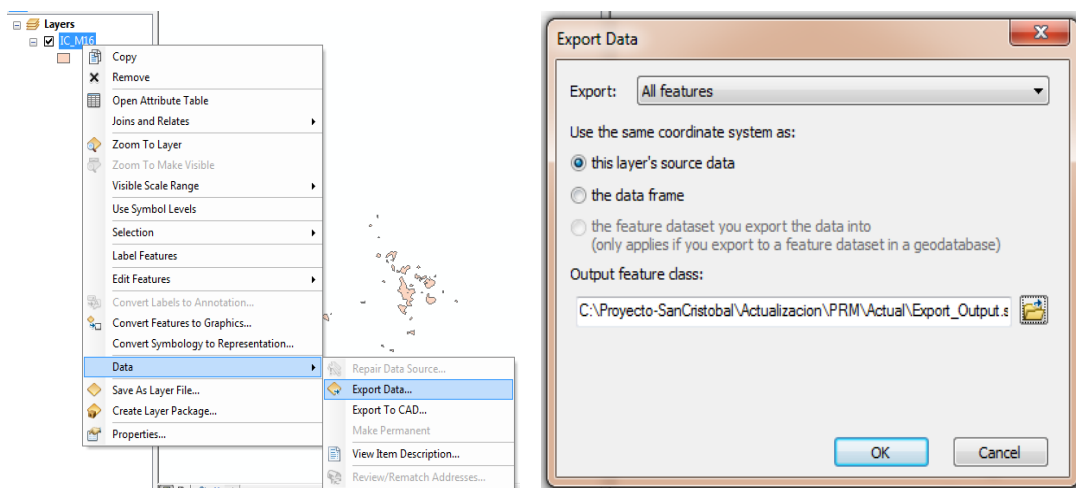


- Cargar capa de temperatura superficial en formato vector

b. Extracción de islas de calor

Dirección: Clic derecho sobre la capa de temperatura superficial >> Open Attribute Table

- Seleccionar las temperaturas superficiales más elevadas
- Cerrar la tabla de atributos
- Clic derecho sobre la capa de temperatura superficial >> Data >> Export Data...
- Output feature class: Direccionar y nombrar la capa de salida (*IC_Año*)
- Ok



En el siguiente mapa conceptual se muestran el orden de los procedimientos llevados a cabo para la determinación de islas de calor con base en los propósitos del presente trabajo.

