



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE GUERRERO

FACULTAD DE INGENIERÍA



TESIS

Generación de cartografía de ocupación y uso de suelo mediante el uso de técnicas de Percepción Remota en la región centro del Estado de Guerrero

QUE PRESENTA

ING. GLORIA ROJAS SÁNCHEZ

PARA OBTENER EL TÍTULO DE

MAESTRÍA EN INGENIERÍA PARA LA INNOVACIÓN Y DESARROLLO TECNOLÓGICO, OPCIÓN TERMINAL: GEOMÁTICA

DIRECTOR DE TESIS

DR. RENÉ VÁZQUEZ JIMÉNEZ

CO-DIRECTOR DE TESIS

DRA. ROCIO NAYELLY RAMOS BERNAL

Chilpancingo, Gro., Enero 2020.

A las personas más importantes de mi vida...

A mi madre

Por su lucha, sacrificio, apoyo ante cualquier situación y mas que nada por traerme a este mundo.

A Rebecca Valentina

Por su ternura, abrazos, besos y fortaleza sincera que demuestra un ser tan pequeño pero con gran energía, te amo.

A Manuel

Por su amor, compañía, y apoyo incondicional para aventurarme en esta etapa, gracias amor.

A mis hermanos

Anais, Daniel y Brizza porque a pesar de las adversidades, siempre seremos hermanos.

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por la beca de manutención asignada durante los dos años del posgrado.

A la Facultad de Ingeniería (UAGro), por darme la oportunidad de estudiar y desarrollarme dentro de las instalaciones, formándome profesionalmente.

Al Doctor René Vázquez Jiménez, por su enseñanza y paciencia para comenzar y culminar este trabajo, gracias por todo.

A la Dra. Rocío N. Ramos Bernal, por sus comentarios acertados y las gratas charlas.

A los Doctores Yan Gao y Jean Francois Mas del CIGA, UNAM, por sus consejos y atenciones durante mi estancia de investigación.

A los revisores y miembros del jurado por sus acertados comentarios.

A los futuros doctores Erandi, Fer, Israel, Jorge que me recibieron gratamente durante mi estancia en el CIGA, UNAM, y me hicieron ser parte de ellos.

A todos mis compañeros de la MIIDT “Cuarta Generación” por hacer los almuerzos y enormes charlas.

A mi mamá y hermanos.

A mi esposo e hija.

Y a todos aquellos que olvido mencionar por la edad.

CONTENIDO GENERAL

INTRODUCCION	1
JUSTIFICACIÓN	3
ALCANCES	3
OBJETIVO GENERAL	4
OBJETIVOS ESPECÍFICOS	4
CAPITULO I.- MARCO TEÓRICO E HIPÓTESIS	
1.1 Antecedentes	5
1.2 Dinámica de la ocupación y uso de suelo	7
1.2.1 Herramientas para estudio sobre la ocupación y uso de suelo	7
1.2.1.1 Percepción Remota	8
1.2.1.1.1 Radiación electromagnética	10
1.2.1.1.2 El espectro electromagnético	10
1.2.1.1.3. Interacciones con la atmosfera	12
1.2.1.1.4 Plataformas y sensores	14
1.2.1.1.5 Resolución de un sistema sensor	15
1.2.1.1.6 Características de las imágenes.....	16
1.2.1.1.7 Misiones satelitales.....	17
1.2.1.2 Sistemas de Información Geográfica.....	21
1.2.1.3 Análisis espacial y modelado de procesos espaciales	23
1.3 La importancia de los datos.....	24
1.4 Hipótesis.....	27
CAPITULO II.- METODOLOGÍA	
2.1 Zona de estudio.....	28
2.2 Conjunto de datos	30
2.2.1 Datos primarios	30
2.2.2 El sistema Landsat	32
2.2.2.1 Imágenes Landsat de Reflectancia de superficie con corrección atmosférica.....	35
2.3 Resumen general de la metodología.....	35
2.4 Preprocesamiento	39
2.4.1 Modelo Digital de Elevación (MDE) y mapas derivados	39
2.5 Corrección topográfica a las imágenes satelitales por el método SCS+C por clasificación de pendientes	42
2.6. Transformación de imágenes	44
2.6.1 Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada.....	44
2.6.2 Análisis de Componentes Principales	46

2.7 Generación de cartografía.....	48
2.7.1 Clasificación supervisada.....	49
2.7.2 Clasificador Gaussiano de Máxima Verosimilitud (Maximum Likelihood Classifier)	50
2.7.3 Definición de leyendas de ocupación y uso de suelo.....	50
2.7.4 Integración de la verdad terreno.....	52
2.8 Evaluación de la precisión de la clasificación.....	57
2.8.1 Matriz de confusión, error de comisión, error de omisión e Índice de concordancia Kappa	58
 CAPITULO III.- RESULTADOS Y DISCUSIÓN	
3.1 Corrección topográfica	61
3.2 Transformación de las imágenes	62
3.2.1 Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada	62
3.2.2 Análisis de Componentes Principales	63
3.3 Generación de cartografía de ocupación y uso de suelo	64
3.3.1 Clasificación y depuración de los mapas de ocupación y uso de suelo	64
3.3.2 Comparación de la cartografía de ocupación y uso de suelo generada (año 2011) con respecto a la Serie V de Vegetación y Uso de Suelo	67
3.3.3 Evaluación de la precisión de la cartografía de ocupación y uso de suelo.....	71
3.3.4 Mapas finales de ocupación y uso de suelo de las fechas de estudio generados por el método de clasificación supervisada por Máxima Verosimilitud.....	77
 CONCLUSIONES.....	 82
 REFERENCIAS.....	 84

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Características del satélite Landsat 5 y 7	19
Tabla 2 Características del satélite Landsat 8.....	19
Tabla 3 Las bandas de cada satélite Landsat y su descripción de cómo se utiliza mejor cada banda.....	20
Tabla 4 Área Mínima Cartografiable para diferentes escalas.....	26
Tabla 5 Detalles del conjunto vectorial topográfico a escala 1:50,000	30
Tabla 6 Series y años de referencia de la información de uso de suelo y vegetación del INEGI.....	31
Tabla 7 Sensores, fechas y bandas de las imágenes consideradas para el estudio	32
Tabla 8 Características de los sensores L5 (TM), L7 (ETM+) y L8 (OLI-TIRS).....	34
Tabla 9 Porcentaje y acumulativo de eigenvalues de la fecha Ene29-2019	47
Tabla 10 Reclasificación de las categorías de la serie V de uso de suelo y vegetación	51
Tabla 11 Organización aleatoria de la verdad terreno para la fecha Mar-21-2000 por categorías de ocupación y uso de suelo en píxeles a usar en el entrenamiento en el modelo de clasificación y píxeles a usar para validar la precisión de la clasificación.....	53
Tabla 12 Organización aleatoria de la verdad terreno para la fecha Feb-24-2011 por categorías de ocupación y uso de suelo en píxeles a usar en el entrenamiento en el modelo de clasificación y píxeles a usar para validar la precisión de la clasificación.....	54
Tabla 13 Organización aleatoria de la verdad terreno para la fecha Ene-29-2019 por categorías de ocupación y uso de suelo en píxeles a usar en el entrenamiento en el modelo de clasificación y píxeles a usar para validar la precisión de la clasificación.....	54

Tabla 14 Estructura de una matriz de confusión	58
Tabla 15 Porcentaje de superficie por categoría de ocupación y uso de suelo de los mapas comparados	70
Tabla 16 Matriz de tabulación cruzada entre mapas de ocupación comparados (ha)...	70
Tabla 17 Matriz de confusión del mapa final de ocupación y uso del suelo comparado con la verdad terreno destinada para la validación. Fecha Ene-29-2019.....	73
Tabla 18 Matriz de confusión del mapa final de ocupación y uso del suelo comparado con la verdad terreno destinada para la validación. Fecha Feb-24-2011	75
Tabla 19 Matriz de confusión del mapa final de ocupación y uso del suelo comparado con la verdad terreno destinada para la validación. Fecha Mar-21-2010.....	76
Tabla 20 Resumen de los principales indicadores de las matrices de confusión aplicadas para la evaluación de los mapas de ocupación y uso de suelo por el método de clasificación por máxima verosimilitud, para las tres fechas de prueba.....	77

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura No. 1 Esquema gráfico de los elementos que componen a la Percepción Remota	9
Figura No. 2 Esquema general de la radiación electromagnética.	10
Figura No. 3 Esquema gráfico del espectro electromagnético	12
Figura No. 4 Esquema gráfico de la dispersión de Rayleigh	13
Figura No. 5 Esquema gráfico de la dispersión de Mie	13
Figura No. 6 Tipos de sensores	14
Figura No. 7 Esquema de una imagen satelital y su configuración en números digitales que corresponden a cada píxel	17
Figura No. 8 Línea de tiempo e historia de las misiones Landsat	18
Figura No. 9 Imágenes de Landsat que muestran los archipiélagos en expansión a lo largo de la costa Dubai, Emiratos Árabes Unidos A, octubre de 1998 (Landsat 5); B, mayo de 2003 (Landsat 7); C, mayo de 2008 (Landsat 5); y D, mayo de 2015 (Landsat 8)	20
Figura No. 10 Componentes de un Sistema de Información Geográfica	21
Figura No. 11 Posibles imprecisiones en la cartografía oficial de ocupación del suelo serie V sobre área de fotografía aérea de 2011 en el área sur de la zona de estudio correspondiente a la región centro del Estado de Guerrero... ..	25
Figura No. 12 Ubicación de la zona de estudio	29
Figura No. 13 Serie V de Uso de suelo y vegetación	31
Figura No. 14 Línea de tiempo del sistema Landsat	32
Figura No. 15 Esquema de la metodología general para la generación de cartografía De ocupación y uso de suelo	35

Figura No. 16 Ejemplo de un modelo desarrollado con el programa Dinámica EGO....	38
Figura No. 17 Modelo Digital de Elevación (MDE) de la zona de estudio	40
Figura No. 18 Mapa de pendientes de la zona de estudio	40
Figura No. 19 Mapa de orientaciones del terreno de la zona de estudio	41
Figura No. 20 Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) correspondiente a la fecha 24 de febrero de 2011	46
Figura No. 21 Imagen multibanda de los componentes principales de la fecha 24 de febrero de 2011 de la zona de estudio.	47
Figura No. 22 Probables imprecisiones en la Serie V de la cartografía oficial de uso de suelo y vegetación sobre fotografía aérea correspondiente al año 2011. Zona norte de la región centro del Estado de Guerrero.....	48
Figura No. 23 Identificación general de las categorías de ocupación y uso de suelo en la zona de estudio. a) Suelo desnudo, b) Asentamientos humanos, c) Bosque, d) Cuerpos de agua, e) Selva baja caducifolia y f) Agrícola.	52
Figura No. 24 Polígonos verdad terreno resultantes de la digitalización de la fecha (febrero 24, 2011).	53
Figura No. 25 Modelo de depuración <i>sal-pimienta</i>	56
Figura No. 26 Esquema global del proceso de clasificación supervisada por el método de Máxima Verosimilitud para la generación de mapas de ocupación y uso de suelo.	57
Figura No. 27 Resultado de la corrección topográfica por el método SCS+C de la fecha Ene29-2019, a) Composición a color RGB antes de la corrección topográfica, b) Composición a color RGB después de aplicar la corrección topográfica.	61
Figura No. 28 Índices NDVI de fechas: a) Mar-03-2000, b) Feb-24-2011 y c) Ene-29-2019.....	63
Figura No. 29 Imagen multibanda de los 3CP de fechas: a) Mar-03-2000, b) Feb-24-2011 y c) Ene-29-2019	64

Figura No. 30 Composición de bandas para la fecha Ene-29-2019. a) En color verdadero, bandas 432, b) En falso color bandas 654; y resultado del proceso de clasificación c) Mapa clasificado sin depurar y d) Mapa clasificado y depurado.....	65
Figura No. 31 Acercamiento sobre una zona urbana con colindancia a poblaciones que se dedican a la agricultura, a) Resultado del proceso de clasificación y b) Resultado del proceso de depuración. Mapa resultado de ocupación y uso de suelo de la fecha Ene-29-2019.....	66
Figura No. 32 Mapa de reclasificación de las cubiertas de la serie V de uso de suelo y vegetación del INEGI (izquierda) y, Mapa resultado de clasificación supervisada por el método Máxima Verosimilitud (derecha) fecha Feb24-2011	68
Figura No. 33 Acercamiento de la zona de estudio. Fotografía aérea (superior izquierda), cartografía oficial de ocupación del suelo serie V (superior derecha), resultado de clasificación y depuración de fecha Feb24-2019 (inferior izquierda), donde se muestran posibles imprecisiones.	69
Figura No. 34 Acercamiento de la zona de estudio en la parte norte (zona minera); Resultado del proceso de clasificación (arriba) y fotografía aérea (abajo). Mapa resultado de ocupación y uso de suelo correspondiente a la fecha Feb-24-2011.	72
Figura No. 35 Mapa de ocupación y uso de suelo resultante para la fecha de Mar21-2000.	78
Figura No. 36 Mapa de ocupación y uso de suelo resultante para la fecha de Feb24-2011.	79
Figura No. 37 Mapa de ocupación y uso de suelo resultante para la fecha de Ene29-2019.....	80

INTRODUCCIÓN

Actualmente, la sociedad enfrenta problemas en los ecosistemas donde habita, sin duda esto se debe en gran parte al calentamiento global que a su vez este se ha ido acelerando y ha sido ocasionado por el desarrollo de actividades antrópicas, así mismo en gran parte de la atención se ha centrado y generado tema de sumo interés sobre todo en el ámbito científico, el cual es un gran desafío en el cual la sociedad debe de actuar y adaptarse. Por otro lado, en los últimos 50 años se tiene conocimiento en donde la transformación de los ecosistemas ha alcanzado magnitudes inimaginables. De los cambios que más destacan son la pérdida de cubiertas forestales y la perturbación de los ecosistemas (Mas et al. 2009). Sin duda, las actividades que se ejercen localmente han realizado efectos que trascienden y afectan el funcionamiento global del sistema (Vázquez-Jiménez, 2017).

Analizando cuestionamientos sobre ¿Dónde ocurren estos cambios? ¿Cuánta superficie se está transformando? ¿Existe realmente información que pueda proporcionar estos datos? El responder a ello es importante, sobre todo en países donde la riqueza natural y cultural es grande y por ende existe la pérdida o degradación de los ecosistemas.

México es un país con una biodiversidad enorme, el cual que se encuentra entre los 5 países llamado megadiversos (CONABIO, 2008) y es así que también se encuentra dentro de las tendencias mundiales de transformación y perturbación de los ecosistemas, con sus dos millones de kilómetros cuadrados de superficie se observa una gran cantidad de cambios que en general están por la media mundial en cuanto a tasas de deforestación, el incremento de zonas agrícolas, la expansión de los asentamientos humanos, actividades industriales, que conllevan a un cambio de cubiertas (Mas et al. 2004, Sánchez-Colón et al. 2008).

La cartografía de uso de suelo y vegetación es un insumo básico desarrollado para el inventario y es utilizado como referencia para la elaboración de múltiples reportes sobre la cubierta vegetal a nivel del país como estadísticas ambientales y reportes agropecuarios. La información sobre ocupación y uso de suelo favorece el monitoreo de los recursos naturales, así como de las áreas que requieren protección y conservación, así como es fundamental para el establecimiento de políticas públicas relacionadas con el ordenamiento territorial. Asimismo, cubiertas como son el bosque y las selvas reportan un gran dinamismo por los cambios en el uso del suelo sustituidos por agricultura y pastizales cultivados (INEGI, 2015).

El Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) ha reportado que la vegetación primaria en 1985 ocupaba el 62% del territorio nacional pero mostró pérdidas

significativas para el 2002, la vegetación primaria es aquella que no ha sufrido cambios significativos por las actividades humanas o perturbaciones naturales, y la vegetación secundaria se desarrolla posteriormente y puede tener una composición y estructura parecida a la primaria; sin embargo, las selvas de 1970 a 2002 se van perdiendo a un ritmo acelerado, principalmente por actividades como el desmonte.

El INEGI ha desarrollado un total de 6 series las cuáles son: Serie I (1985), Serie II (1993), Serie III (2002), Serie IV (2007), Serie V (2011) y Serie VI (2014) representada en una escala de 1:250,000 denominada conjunto nacional (INEGI, 2015). Analizando estos datos, se tiene en cuenta que la información que se tiene hasta cierto punto es insuficiente, no se cuenta con información para fechas específicas que pudieran de alguna manera servir para el desarrollo de estudios, es por ello que la cartografía oficial que dispone INEGI puede verse comprometida a que existe una desactualización temporal, así mismo la escala que maneja no es la adecuada para estudios a escala regional o local.

El recurrir a herramientas geotecnológicas que faciliten el desarrollo de cartografía de ocupación y uso de suelo, para fechas, zonas y escalas específicas. Para ello es preciso apoyarse de la Geomática, toda vez que es la ciencia encargada de conjuntar las técnicas para integrar, procesar, almacenar y difundir información espacialmente referenciada, con apoyo modelos de conocimiento fundamentales como son la Percepción Remota, Sistemas de Información Geográfica y el Análisis y Modelado de procesos espaciales, las cuales interactúan y se complementan unas a otras.

La disposición de las imágenes de satélite ha favorecido el desarrollo de la cartografía temática, sobre todo porque ahora se cuenta con información de libre acceso, con la temporalidad adecuada, una resolución espacial y calidad aceptable.

El presente trabajo considera la generación de mapas de ocupación y uso de suelo en la región centro del Estado de Guerrero, esto por ser una zona que está compuesta por dos cubiertas importantes como es el bosque y la selva baja caducifolia, cubiertas que presentan perturbaciones por las actividades ejercidas sobre el área, como es el caso de la zona minera, la cual es una actividad que está en constante crecimiento en el Estado de Guerrero.

Se propone una metodología con el fin de generar cartografía de ocupación y uso de suelo en la región centro del Estado de Guerrero, explorando la información que proporciona INEGI, en cuanto a disponibilidad, calidad y detalle. Asimismo, se cruza información con imágenes de la misión Landsat de los sensores 5-TM, 7-ETM y 8-OLI; implementando con ellas el método de clasificación supervisada por Máxima Verosimilitud, en una serie temporal de un periodo de 19 años, con el fin de que los mapas generados puedan eventualmente ser utilizados para la evaluación de la transformación del paisaje, gestión y conservación de los recursos naturales de la zona.

JUSTIFICACIÓN

El cambio global de la tierra no es un problema de futuro, si no una realidad en la que se vive cada día, donde las actividades que son ejercidas localmente tienen consecuencias y afectan el funcionamiento de los ecosistemas. La superficie terrestre está compuesta de recursos naturales, los cuáles son finitos, frágiles y no renovables; entre los principales y que es de mayor importancia es el suelo, debido a que es un medio que sirve para el desarrollo de actividades y sustento de la vida sobre el planeta.

El ser humano, es el principal agente transformador de su medio, modificándolo a su beneficio, así mismo éste está en constante cambio y adaptación, ocasionando la transformación del paisaje; cabe hacer mención que en México no escapa de este tipo de tendencias que se dan a nivel mundial, las cuales están asociadas a la pérdida de vegetación, la deforestación, las actividades industriales, la creación y/o modernización de infraestructura y a la expansión de la población.

Este tipo de acciones han generado cambios en la cubierta terrestre y es preciso recurrir a la Geomática, para que con el apoyo de herramientas geotecnológicas como la Percepción Remota, los Sistemas de Información Geográfica y el Análisis y Modelado de procesos espaciales generar una metodología para elaborar cartografía de ocupación y uso de suelo, para la región centro del Estado de Guerrero con una escala temporal de 19 años.

ALCANCES

Generar cartografía de ocupación y uso de suelo a partir de imágenes Landsat apoyándose de técnicas de Percepción Remota, recabando información de las distintas plataformas proveedoras de información satelital y/o vectorial, y a su vez esta sea procesada, transformada, clasificada y evaluada hacia zonas y fechas de interés, y que de alguna manera sean insumos para la toma de decisiones.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Desarrollar una metodología para la generación de cartografía de ocupación y uso de suelo de la región centro del estado de Guerrero, utilizando imágenes Landsat en una escala temporal de 19 años, y que ésta sea usada con fines de evaluación, gestión y conservación de los recursos naturales.

OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Evaluar la información de vegetación y uso del suelo del INEGI en cuanto a disponibilidad, calidad y detalle, cruzando la información con imágenes satelitales comparables en fechas.
- Explorar la disponibilidad de las distintas imágenes de satélite de la misión Landsat que cubran la zona de estudio para implementarlas en el desarrollo del proyecto.
- Generar los mapas de ocupación y uso de suelo de una serie temporal de 3 imágenes que cubran un periodo de 19 años de la región centro del Estado de Guerrero.

CAPÍTULO I. MARCO TEÓRICO E HIPÓTESIS

1.1. Antecedentes

En los últimos 50 años se han transformado los ecosistemas en magnitudes inimaginables. Sin embargo, los cambios más notables son la pérdida de la cubierta forestal, la perturbación de los ecosistemas y el incremento poblacional; estos son patrones asociados a los procesos de degradación. ¿Dónde ocurren estos cambios?, ¿de qué magnitud son? y ¿cuáles serán los escenarios posibles?, son preguntas recurrentes y relevantes para cada país (Mas et al. 2009). Esto es crucial para aquellos países donde por un lado se concentra la mayor riqueza natural y cultural, así como las mayores tasas de pérdida y degradación de los ecosistemas. La respuesta a las preguntas anteriores sería realizar un análisis del cambio en la ocupación y uso del suelo. Vitousek y colaboradores (1997) documentan que este tipo de análisis permite entender las causas y consecuencias de las tendencias de los procesos de degradación, desertificación, disminución de la biodiversidad y, en general, pérdida del capital natural y cultural.

Los patrones del uso del suelo ejercen un efecto importante sobre la biodiversidad, así como en la estructura y funcionamiento de los ecosistemas, pudiendo potenciar los procesos de deterioro de la fertilidad de suelo, de la calidad del agua y la pérdida del hábitat, que en consecuencia, afectan la provisión de bienes y servicios ambientales, además de traer consigo una pérdida de conectividad hidrológica, lo que modifica el transporte de materia, energía y de organismos dentro o entre los elementos del ciclo hidrológico (Freeman *et al.* 2007; Peña-Cortés *et al.* 2011).

Es importante, el uso de la información organizada en bases de datos donde se evidencien los cambios de ocupación y uso del suelo para su documentación y asimismo sean utilizados para el desarrollo de estudios con fines académicos o de gestión. A partir de ello, se deducen escenarios sobre la pérdida del capital natural o biodiversidad, se generan modelos sobre los posibles efectos del cambio global y se fundamentan las estrategias de planificación de uso del suelo. (Mas et al. 2008).

Las tendencias que se observan a nivel mundial sobre la transformación y perturbación de los ecosistemas son similares a las que se viven en México. En sus casi dos millones de km² del territorio mexicano son visibles las dramáticas transformaciones del paisaje y los cambios en cuanto a las tasas de deforestación, expansión urbana, incremento de las áreas de cultivo y pastoreo (Mas et al. 2004, Sánchez Colón *et al.* 2008).

Existen registros que indican que entre 2002 y 2007 se dio una pérdida bruta aproximadamente 21,968 km²; lo que equivale al 1.48% de la superficie de la cubierta natural registrada en el 2002 y una pérdida anual de 4,391km², el equivalente a un 0.3% por año donde la superficie vegetal de México sufre cambios de ocupación y/o uso

principalmente para fines agrícolas, urbanización, industrias e infraestructura (Victoria et al. 2013).

En México, como en la mayor parte del mundo, aún no existe la cultura de someter una base de datos cartográfica a una evaluación rigurosa. Actualmente es casi nulo las experiencias que incluyan un diseño estadísticamente robusto (Couturier y Mas 2009). Hablando del territorio mexicano se dice que es muy extenso, topografía montañosa, gran diversidad de tipos de coberturas vegetales, dinamismo de los paisajes, entonces elaborar cartografía sobre uso/cobertura del suelo para México es laborioso. Entonces, debido a su extensión del terreno es un reto poder contar con insumos de la resolución espacial adecuada, dado que por un lado a una escala muy pequeña (e.g., 1:1,000,000) se perdería la enorme cantidad de procesos locales sobre la dinámica de la cubierta y uso del suelo. Por otro lado, a una escala muy grande (1:50,000) resultaría muy costoso mantener la base de datos actualizada (Mas et al. 2009).

En los últimos 30 años la transformación de las superficies de bosque en áreas agropecuarias o urbanas se ha vuelto un proceso muy común en varias regiones de México (Landa et al. 1997, Velázquez et al. 2002, Salazar et al. 2004). La pérdida de las cubiertas vegetales está asociada con la sobreexplotación y como consecuencia se afecta la recarga de mantos acuíferos, incrementa la tasa de erosión, aumenta la tasa de sedimentos en presas y lagos, aumenta el riesgo de inundaciones causadas por el desbordamiento de ríos y cambia las condiciones climáticas locales y regionales (Masera 1996, Ordoñez et al. 2000).

El escenario descrito con anterioridad ha puesto en alerta general a los gobiernos del mundo y en la actualidad es necesario desarrollar estudios y análisis científicos sobre la dinámica y ocupación y uso de suelo. Estos están orientados a conocer cuáles son los cambios específicos que se han registrado dentro de un marco referencial de tiempo, y los lugares específicos que han sido transformados (Vázquez-Jiménez, 2017).

De acuerdo con Veldkamp y Fresco (1996), el uso del suelo está determinado por las interacciones en espacio y tiempo de los factores biofísicos (limitantes) como los suelos, el clima, la topografía, etc., y los factores humanos como la población, tecnología, condiciones económicas, etc. Agarwal y colaboradores (2002) proponen, para analizar los modelos de cambio de uso de suelo, un marco de trabajo basado en tres dimensiones críticas para categorizar y resumir los modelos de la dinámica hombre-ambiente. El espacio y el tiempo son las primeras dos dimensiones, la tercera dimensión sería la elección humana, en donde proporcionan un escenario común en el que operan los procesos biofísicos y humanos. En otras palabras, los modelos de los procesos biofísicos y/o humanos operan en un contexto temporal, en un contexto espacial, o en ambos.

Los estudios de ocupación y uso de suelos basados en el procesamiento digital

de imágenes de satélite han permitido identificar, monitorear y cuantificar a escala regional los grandes procesos de cambio de la cubierta vegetal (Coppin et al. 2004).

El número de investigaciones sobre la dinámica de la ocupación y uso del suelo basados en imágenes de satélite ha crecido exponencialmente en los últimos años, pero, aunque la Percepción Remota es reconocida como un instrumento práctico para el monitoreo ambiental y la valoración de los recursos naturales, enfrenta obstáculos como la dificultad de interpretar consistentemente las características espectrales de la superficie bajo un amplio tipo de condiciones ambientales (Mas et al. 2004).

En este mismo orden de ideas, los estudios sobre procesos de cambio en la ocupación y uso de suelo son centro de atención de investigaciones ambientales. La relación entre los procesos de cambio de ocupación y uso del suelo (causas, efectos y escenarios) y los fenómenos asociados se identifican de mejor manera mediante el modelado espacial de los eventos y su representación cartográfica, la cual es de gran ayuda, porque lleva un seguimiento progresivo de acuerdo con la evaluación de tasas de cambio.

1.2. Dinámica de la ocupación y uso de suelo

Actualmente, gobernantes y personas especializadas en este campo de estudio, son las encargadas de desarrollar estudios científicos sobre la dinámica de ocupación y uso del suelo y de dar a conocer los cambios específicos que se han registrado dentro de un margen de tiempo, así como los lugares que se han visto afectados por estas constantes modificaciones que ejerce el hombre.

1.2.1. Herramientas para estudios sobre la ocupación y uso de suelo

Los inicios del monitoreo ecológico global se iniciaron en 1849, con las primeras redes de observatorios meteorológicos en EE. UU., y antes de contar con registros instrumentales, los cambios eran inferidos de observaciones indirectas de otros factores, por ejemplo, los anillos de crecimiento de los árboles veteranos o analizar las burbujas que quedaban atrapadas en el hielo. A través de estos registros ha sido posible reconstruir la dinámica en el planeta. (Duarte et al. 2009).

La Geomática proporciona modelos y marcos teóricos adecuados para evaluar la transformación del paisaje, que brindan soporte al desarrollo de estudios de la dinámica de ocupación y uso del suelo cuyo alcance va mucho más allá de la recopilación y representación de la información en mapas de paisaje. (Vitousek et al. 1997).

Es por ello por lo que a partir de los mapas de uso de suelo y vegetación se puede identificar, representar, describir, cuantificar, localizar, analizar, evaluar, explicar y

modelar los procesos de cambio y la dinámica que ocurre en la ocupación y usos del suelo de un espacio geográfico y en un tiempo específico (Camacho-Sanabria et al. 2015)

Para comprender el concepto de lo que es la Geomática, se define de la siguiente manera: *“Es la conjugación de ciencia y tecnología aplicada en el análisis multidisciplinario de problemáticas que relacionan al ser humano con su espacio que permite la construcción de conocimiento colectivo como soporte en la resolución de problemáticas geoespaciales con visión holística en beneficio de la sociedad”*, (Vázquez-Jiménez 2011).

Para la evaluación de los efectos de la ocupación y uso del suelo, resulta útil la aplicación de la Geomática, principalmente para el reconocimiento del paisaje relacionándose con el conocimiento de su composición y de la configuración espacial de los elementos que la integran y cuyas interacciones afectan los procesos ecológicos, la persistencia de las especies y consecuentemente la propia conformación y configuración del paisaje (McGarigal, Marks 1995, Turner et al. 2001).

Es recomendable usar herramientas geotecnológicas para el desarrollo de este tipo de estudios, con el fin de generar propuestas y acciones tendientes a la mejora de un bien en la población. Estas herramientas que conllevan el desarrollo de este análisis son la geomática, la cual se auxilia de la Percepción Remota, Sistemas de Información Geográfica, Análisis Espacial y el Modelado de Procesos Espaciales.

1.2.1.1. Percepción Remota

La percepción remota es la ciencia de adquirir información acerca de la superficie terrestre, sin estar en contacto con ella. Esto se realiza por la percepción y grabado de energía reflejada o emitida la cual se procesa, analiza y aplica la información. En gran parte la percepción remota, el proceso involucra una interacción entre el incidente de radiación y los objetivos de interés (Natural Resources Canada, 2015). A continuación, se mencionan los siete elementos que trabajan en conjunto para la Percepción Remota (fig. 1):

1. **Fuente de energía o iluminación.** El primer requisito para la percepción remota es tener una fuente de energía que ilumine o que proporcione energía electromagnética para nuestra meta de interés.
2. **Radiación y la atmosfera.** Como la energía viaja hacia nuestro objetivo de interés (elemento espacial), esta se pone en contacto con la atmosfera. Esta interacción puede tener lugar en segundo tiempo para que la energía viaje hacia la meta del sensor.

3. **Interacción con la meta.** Una vez que la energía hace su camino hacia el objetivo a través de la atmosfera, esta interactúa con el objetivo dependiendo de las propiedades de los dos, el objetivo y la radiación.
4. **Registro de la energía en el sensor.** Después de que la energía ha sido escaneada, emitida desde el objetivo, se requiere de un sensor para recoger y grabar la radiación electromagnética.
5. **Transmisión, recepción y procesamiento.** La energía grabada por el sensor se transmite en forma electrónica.
6. **Interpretación y análisis.** El procesamiento de la imagen es interpretado visual y digital o electrónicamente, a la información extraída sobre el objetivo con que fue iluminado.
7. **Aplicación.** El elemento final del proceso de la percepción remota es logrado cuando aplicamos la información, hemos sido capaces de extraer desde las imágenes del objetivo, con el de entenderlas mejor, algunas revelan nueva información, o simplemente sirven para resolver algún problema en particular.

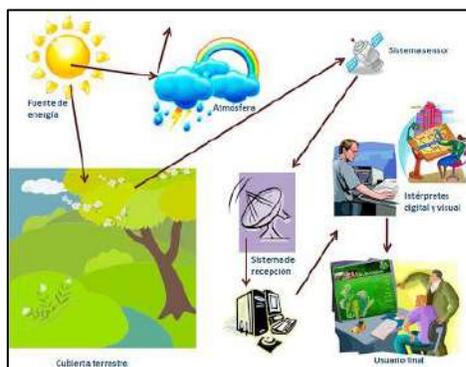


Figura No. 1 Esquema gráfico de los elementos que compone la Percepción Remota. Fuente: http://4.bp.blogspot.com/_HJVjYZVAGIg/Sp8V3IYqeJI/AAAAAAAAAAU/2cGkpdAJSlA/s400/componente+pr.jpg Consultado el 07 de mayo de 2018.

De acuerdo con la estructura y propiedad de los elementos espaciales, será la forma en que reaccionan ante la energía, pudiendo ésta ser absorbida, transmitida o dispersa y parte de esta energía es registrada por sensores en forma de radiación electromagnética. Este registro es transmitido, procesado y distribuido en forma de imagen al servicio de usuarios para extraer información específica sobre los elementos registrados y aplicarla en estudios del territorio (Campbell, Wynne 2011).

Las principales aplicaciones de la percepción remota según Chuvieco (2010) se encuentran en: Estudios de erosión, Inventario regional del medio ambiente para estudios de impacto ambiental, Cartografía Geológica para exploración mineral y petrolífera,

Cartografía de nuevos depósitos volcánicos, Cartografía de cobertura vegetal del suelo, Cartografía e inventario de cultivos por especies, Cartografía e inventario de la cobertura y uso del suelo, Inventarios Forestales, Obras Civiles, Estudios Multitemporales, Estimación de modelos de escorrentía y erosión, Inventario de aguas superficiales e Inventario de Cultivos por especies.

1.2.1.1.1. Radiación electromagnética

La radiación electromagnética consta de un campo eléctrico que varía en magnitud en una dirección perpendicular a la dirección en la que la radiación está viajando, y un campo magnético orientado en ángulo recto con el campo eléctrico. Estos dos campos se desplazan a la velocidad de la luz (fig. 2). Las características más importantes para la comprensión de la teledetección son la *longitud de onda* y la *frecuencia*; la primera mide la distancia entre crestas de las olas sucesivas, mide en metros (m), nanómetros (nm), micrómetros (micras), centímetros (cm). La frecuencia se refiere al número de ciclos de una onda que pasa en un punto fijo por unidad de tiempo y normalmente se mide en Hertz (Hz), equivalente a un ciclo por segundo y varios múltiplos de Hertz (Natural Resources Canada, 2015).

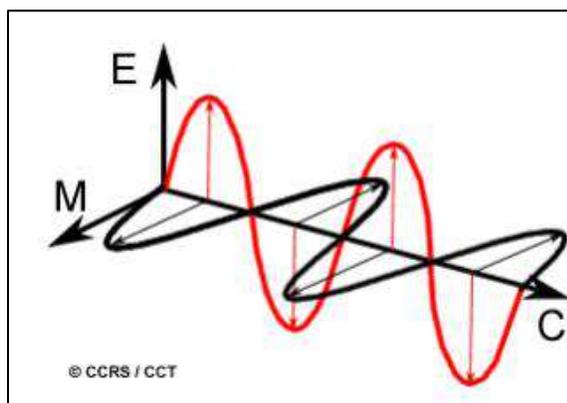


Figura No. 2 Esquema General de la Radiación Electromagnética. Tomado de Natural Resources Canada (2015).

1.2.1.1.2. El espectro electromagnético

El espectro electromagnético se extiende desde las longitudes de onda más cortas (incluyendo Gamma y Rayos X) a las longitudes de onda más largas (como microondas y ondas de radio emitidas). Algunos materiales de la superficie de la Tierra, principalmente rocas y minerales, fluorescen o emiten luz visible cuando se ilumina por la radiación UV. Las longitudes de onda visibles cubren un rango de 0.4 a 0.7 micras. La longitud de onda visible más larga es de color rojo y las más corta es violeta (Natural Resources Canada, 2015). Las longitudes de onda perciben los colores más comunes, se enumeran a continuación:

- Violeta: 0.4-0.446 μm
- Azul: 0.446-0.500 μm
- Verde: 0.500-0.578 μm
- Amarillo: 0.578-0.592 μm
- Naranja: 0.592-0.620 μm
- Rojo: 0.620-0.7 μm

Azul, verde y rojo son los colores primarios o longitudes de onda del espectro visible. Se definen como tales porque no se puede crear un solo color primario de los otros dos, pero todos los otros colores se pueden formar combinando azul, verde y rojo en varias proporciones. Aunque vemos la luz solar como un color uniforme o homogéneo, en realidad está compuesta de varias longitudes de onda de radiación en principalmente las partes ultravioleta, visible e infrarroja del espectro. La porción visible de esta radiación se puede mostrar en sus colores componentes cuando la luz del sol es pasada a través de un prisma, que dobla la luz en cantidades diferentes según la longitud de onda (Natural Resources Canada, 2015).

Ahora bien, desde el punto de vista de la Percepción Remota, conviene destacar las series de bandas espectrales, que son más frecuentemente usadas con la tecnología actual. Su denominación y amplitud varían según varios autores, por lo que Chuvieco 2010 los denomina de la siguiente manera (fig. 3):

Espectro visible (0.4 a 0.7 μm). Se denomina así por tratarse de la única radiación electromagnética, que pueden percibir nuestros ojos, coincidiendo con las longitudes de onda en donde es máxima la radiación solar. Suelen distinguirse tres bandas elementales que denominan azul (0.4 a 0.5 μm); verde (0.5 a 0.6 μm) y rojo (0.6 a 0.7 μm), debido a los colores elementales asociados a esas longitudes de onda.

Infrarrojo próximo (0.7 a 1.3 μm). A veces se denomina también infrarrojo reflejado y fotográfico, puesto que puede detectarse a partir de films dotados de emulsiones especiales. Resulta de especial importancia por su capacidad para discriminar masas vegetales y concentraciones de humedad.

Infrarrojo medio (1.3 a 8 μm), en donde se entremezclan los procesos de reflexión de la luz solar y emisión de la superficie terrestre. Infrarrojo lejano o térmico (8 a 14 μm), que incluyen la porción emisiva del espectro terrestre.

Microondas (a partir de 1mm), con gran interés por ser un tipo de energía bastante transparente a la cubierta nubosa.

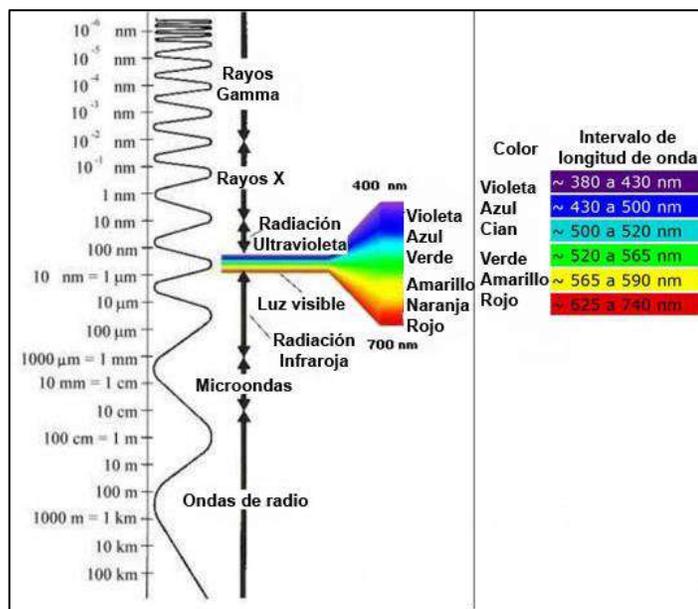


Figura No. 3 Esquema gráfico del Espectro electromagnético. Fuente: <http://newbranch.info/reaccion-quimica-de-la-emision-de-luz>. Consultado el 27 de mayo de 2018.

1.2.1.1.3. Interacciones con la atmosfera

Antes de que la radiación llegue a la superficie de la Tierra, tiene que viajar desde la fuente emisora de energía (sol) y cruzar la atmósfera de la Tierra. Las partículas y los gases en la atmósfera pueden afectar la luz y la radiación entrantes. Estos efectos son causados por los mecanismos de dispersión y absorción.

La dispersión ocurre cuando partículas o moléculas de gas grandes presentes en la atmósfera interactúan y hacen que la radiación electromagnética sea redirigida de su trayectoria original. La cantidad de dispersión depende de varios factores incluyendo la longitud de onda de la radiación, la abundancia de partículas o gases y la distancia que la radiación viaja a través de la atmósfera (Natural Resources Canada, 2015).

La *dispersión de Rayleigh* ocurre cuando las partículas son muy pequeñas en comparación con la longitud de onda de la radiación. Éstas podrían ser partículas tales como partículas pequeñas de polvo o moléculas de nitrógeno y oxígeno. La dispersión de Rayleigh hace que las longitudes de onda de energía más cortas sean más dispersas que las longitudes de onda más largas. La dispersión de Rayleigh es el mecanismo de dispersión dominante en la atmósfera superior.

El hecho de que el cielo aparece "azul" durante el día es debido a este fenómeno. A medida que la luz solar pasa a través de la atmósfera, las longitudes de onda más cortas (es decir, azul) del espectro visible se dispersan más que las otras longitudes de onda visibles (más largas). Al amanecer y al atardecer la luz tiene que viajar más lejos a

través de la atmósfera que al mediodía y la dispersión de las longitudes de onda más cortas es más completa (fig. 4); esto deja una mayor proporción de las longitudes de onda más largas para penetrar en la atmósfera (Natural Resources Canada, 2015).

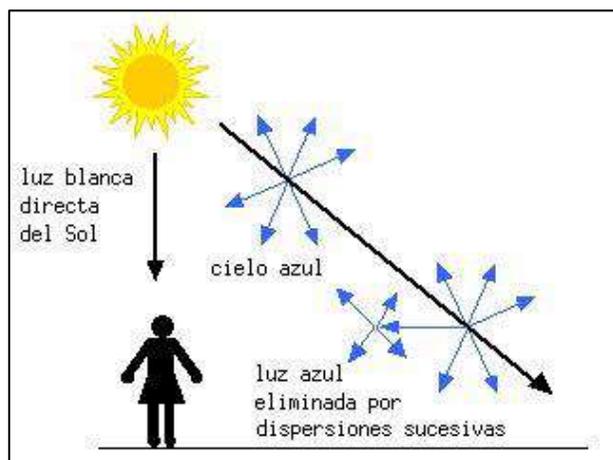


Figura No. 4 Esquema grafico de la Dispersión de Rayleigh.

<http://www.fcaglp.unlp.edu.ar/~scellone/SAC/Divul/CieloAzul/CieloAzul.html>. Consultado el 27 de mayo de 2018).

La *dispersión de Mie* ocurre cuando las partículas tienen aproximadamente el mismo tamaño que la longitud de onda de la radiación. El polvo, el polen, el humo y el vapor de agua son causas comunes de dispersión de Mie que tiende a afectar a longitudes de onda más largas que las afectadas por la dispersión de Rayleigh. La dispersión de Mie ocurre principalmente en las porciones más bajas de la atmósfera donde las partículas más grandes son más abundantes, y domina cuando las condiciones de la nube están cubiertas (fig. 5) (Natural Resources Canada, 2015).

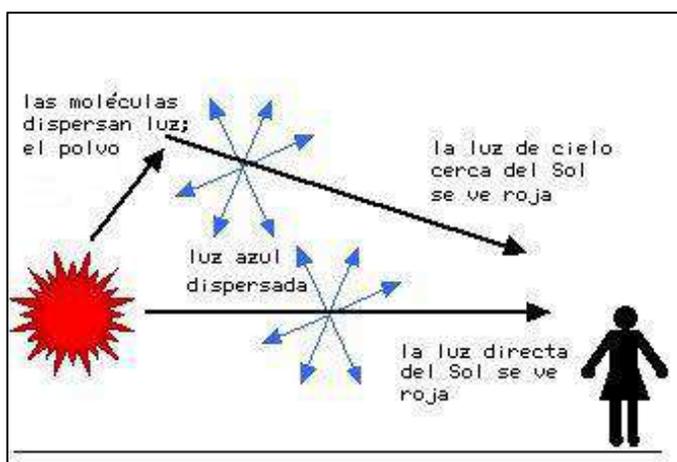


Figura No. 5 Esquema gráfico de la Dispersión de Mie <http://ramanujan25449.blogspot.com/2017/01/los-colores-del-cielo.html>. Consultado el 27 de mayo de 2018.

El mecanismo de dispersión final de importancia se llama *dispersión no selectiva*. Esto ocurre cuando las partículas son mucho más grandes que la longitud de onda de la radiación. Las gotitas de agua y las grandes partículas de polvo pueden causar este tipo de dispersión. La dispersión no selectiva obtiene su nombre del hecho de que todas las longitudes de onda están dispersas aproximadamente igual. Este tipo de dispersión hace que la niebla y las nubes aparezcan blancas a nuestros ojos porque la luz azul, verde y roja están dispersas en cantidades aproximadamente iguales (azul + verde + luz roja = luz blanca) (Natural Resources Canada, 2015).

La absorción es el otro mecanismo principal en el cual la radiación electromagnética interactúa con la atmósfera. En contraste con la dispersión, este fenómeno hace que las moléculas en la atmósfera absorban energía a varias longitudes de onda. El ozono, el dióxido de carbono y el vapor de agua son los tres principales componentes atmosféricos que absorben la radiación.

1.2.1.1.4. Plataformas y sensores

Las plataformas son instrumentos que sirven para portar un sensor que capta y registra la energía reflejada en una superficie. Las plataformas pueden ser terrestres, aéreas y espaciales. De acuerdo con la fuente de energía, los sensores se clasifican en:

- *Sensores activos*: proporcionan su propia fuente de energía para la iluminación. El sensor emite radiación que está dirigida hacia el objetivo a investigar. La radiación reflejada de ese objetivo es detectada y medida por el sensor. Las ventajas de los sensores activos incluyen la posibilidad de obtener mediciones en cualquier momento, independientemente de la hora del día o de la estación. Los sensores activos pueden utilizarse para examinar longitudes de onda que no son suficientemente proporcionadas por el sol, como las microondas, o para controlar mejor la forma en que se ilumina un objetivo. Sin embargo, los sistemas activos requieren la generación de una cantidad bastante grande de energía para iluminar adecuadamente los objetivos. Algunos ejemplos de sensores activos son el radar que es transportado por el satélite canadiense Radarsat y los satélites de la serie ERS de la Agencia Espacial Europea (ESA) y otro sería el Lidar (Light Detection And Ranging) que es un captador activo, análogo al radar pero con tecnología láser, comúnmente utilizado para topografía de precisión desde aviones. (fig. 6a).
- *Sensores pasivos*: Los sensores pasivos sólo se pueden utilizar para detectar la energía cuando la energía natural está disponible. Para toda la energía reflejada, esto sólo puede tener lugar durante el tiempo cuando el sol está iluminando la Tierra. No hay energía reflejada disponible del sol en la noche. La energía que se emite de forma natural (como el infrarrojo térmico) se puede detectar día o noche, siempre y cuando la cantidad de energía sea lo suficientemente grande como para ser registrada (fig. 6b).

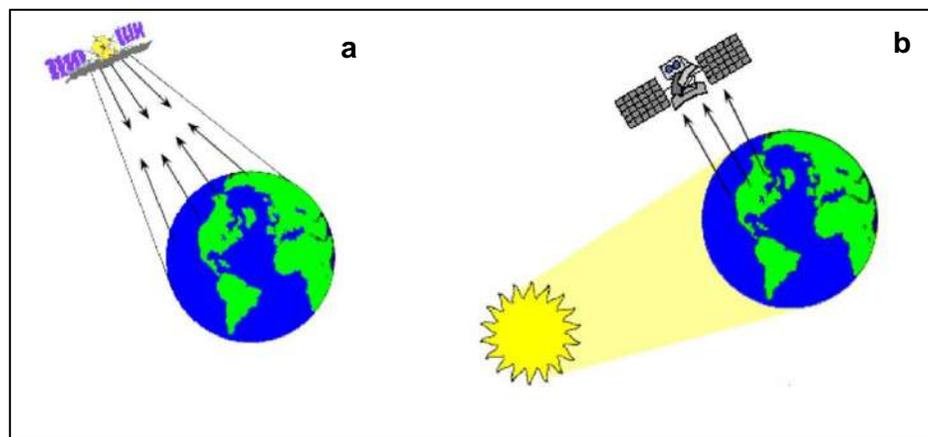


Figura No. 6 Tipos de sensores, a. Activo, b. Pasivo. Tomado de Natural Resources Canada (2015).

1.2.1.1.5. Resolución de un sistema sensor.

La resolución de un sensor engloba varios aspectos, depende del efecto combinado de varios componentes; como es “discriminando” e “información a detalle”, ambos son relativos al propósito y al entorno geográfico del proyecto que se esté abordando. La separabilidad entre ambos objetos está en íntima relación con la escala del trabajo y la complejidad del paisaje. Un breve ejemplo sería que se pueden detectar rasgos geográficos, como ríos, carreteras, de anchura inferior a la resolución espacial del sensor, siempre y cuando exista suficiente contraste radiométrico entre la señal proveniente de estos rasgos y las cubiertas vecinas. Ahora bien, en información a detalle, conviene mencionar que no solo se refiere al detalle espacial que proporciona al sensor, sino también al número y anchura de bandas del espectro que alberga, a su cadencia temporal y la capacidad para distinguir variaciones de la energía que detecta (Campbell, 1987). El concepto resolución implica cuatro exposiciones:

Resolución espacial. Este concepto designa al objeto más pequeño que puede ser distinguido sobre una imagen. Cuanto menor es el área terrestre representada por cada píxel en una imagen digital, mayores son los detalles que poder ser captados y mayor resolución espacial. Existen diferentes factores que influyen en la resolución espacial como son las influencias atmosféricas, presencia de humo, neblina, bajos niveles de iluminación, etc. Se mide en unidades de longitud (mm sobre la foto y m sobre el terreno), y depende de la longitud focal de la cámara y de su altura sobre la superficie (Chuvieco, 2010).

Resolución espectral. Indica el número y anchura de las bandas espectrales que puede discriminar el sensor, es decir, registrar simultáneamente el comportamiento de los objetos en distintas bandas del espectro. En este sentido, un sensor será tanto más idóneo cuanto mayor número de bandas proporcione, ya que facilita la caracterización espectral de las distintas cubiertas; estas bandas tienen que ser suficientemente

estrechas, con objeto de recoger la señal sobre regiones coherentes del espectro (Chuvieco, 2010).

Resolución radiométrica. Es la capacidad para detectar variaciones en la radiancia espectral que recibe. En general, cuando mayor es el número de niveles mayor es el detalle con que se podrá expresar dicha información. Los números digitales asociados a cada píxel en las imágenes digitales y que generan lo que se llama como escala de grises, pero en realidad es la escala de niveles digitales disponibles para representar los detalles de la imagen. El número de valores que incluye ese rango es el número máximo de niveles digitales de la imagen, y suelen identificarse con la resolución radiométrica del sensor. El número de niveles de grises se expresa comúnmente en términos de dígitos binarios (bits) necesarios para almacenar el valor del nivel de gris máximo para el caso considerado.

La mayoría de los sistemas ofrecen 256 niveles por píxel, es decir de 0 a 255 (Martínez-Muñoz y Díaz-Ponce, 2005). Chuvieco, (2010) afirma que “inicialmente los Landsat-MSS ofrecían un rango de 128 niveles de codificación (7 bits, $2^7=128$) por píxel, con 64 (6 bits) para el infrarrojo cercano”. Hoy en día la mayoría de los sistemas ofrecen 256 niveles por píxel es decir 8 bits como es el caso de Landsat 5 (TM) y Landsat 7 (ETM+), mientras que Landsat 8 (OLI-TIRS) opera con 16 bits, es decir 65,536 niveles de píxel.

Resolución temporal. Este concepto alude a la frecuencia de cobertura que proporciona el sensor. De otro modo, se refiere a la periodicidad con la que este adquiere imágenes de la misma porción de la superficie terrestre. El ciclo de cobertura está en función de las características orbitales de la plataforma (altura, velocidad e inclinación), así como el diseño del sensor, principalmente del ángulo de observación y de apertura (Chuvieco, 2010).

1.2.1.1.6. Características de las imágenes

La energía electromagnética puede detectarse fotográfica o electrónicamente. Una imagen satelital es una representación visual de los datos reflejados por la superficie terrestre de la tierra que captura un sensor montado en un satélite artificial. Los datos son enviados a una estación terrena en donde se procesa y se convierten en imágenes, enriqueciendo el conocimiento de las características de la tierra en diferentes escalas espaciales.

Las imágenes en formato ráster se componen de una matriz regular o rejilla de celdas. A cada una de ellas se le conoce como píxel y se le asigna un valor digital que corresponde a la reflectividad recogida por el sensor.

Las imágenes digitales están comprendidas por píxeles, en el cuál cada pixel da cierto tipo de información de acuerdo a su respuesta espectral. El valor que otorga cada píxel puede ser estudiado a través de un computador, donde las tonalidades varían en el rango de la escala de grises en donde el ND=0 indica negro y el ND=255 indica blanco, claro, en cierto caso que la imagen fuese de 8bits.

Una fotografía también podría ser representada y visualizada en un formato digital subdividiendo la imagen en pequeñas áreas de tamaño y forma iguales, llamadas elementos de imagen o píxeles, y representando el brillo de cada área con un valor numérico o número digital. Una fotografía que es escaneada es subdividida en píxeles con cada píxel asignado un número digital que representa su brillo relativo. La computadora muestra cada valor digital como diferentes niveles de brillo (fig. 7).

Los sensores que registran energía electromagnética registran electrónicamente la energía como una matriz de números en formato digital desde el principio. Estas dos maneras diferentes de representar y mostrar los datos de la percepción remota, ya sea pictórica o digitalmente, son intercambiables, ya que transmiten la misma información.

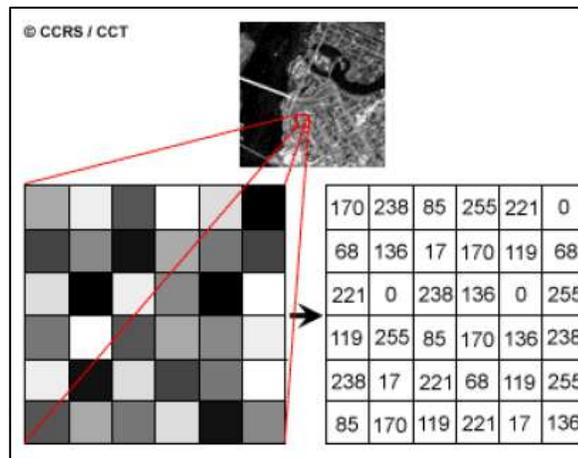


Figura No. 7 Esquema de una imagen satelital y su configuración en números digitales que corresponden a cada píxel. Tomado de Natural Resources Canadá (2015).

1.2.1.1.7. Misiones satelitales

Gran parte de las misiones satelitales se encargan del estudio de los recursos naturales, los cuales operan en ondas heliocéntricas o en órbitas de sincronización terrestre llamadas geosincrónicas. Las misiones satelitales más importantes son LANDSAT 8, Sentinel, Sentinel 2, ERS-1 Y 2 (ESA) Landsat 5 y 7 (USA), IKONOS, SPOT, RADARSAT (Canadá), JERS-1 (Japón) y ASTER.

A mediados de la década de 1960, estimulado por los éxitos de EE. UU. En la exploración planetaria utilizando satélites de teledetección no tripulados, el Departamento

del Interior, la NASA y el Departamento de Agricultura se embarcaron en un ambicioso esfuerzo para desarrollar y lanzar el primer satélite civil de observación de la Tierra. Su objetivo se alcanzó el 23 de julio de 1972, con el lanzamiento del Satélite de Tecnología de Recursos de la Tierra (ERTS-1), que más tarde fue rebautizado como Landsat 1. Los lanzamientos de Landsat 2, Landsat 3 y Landsat 4 siguieron en 1975, 1978 y 1982, respectivamente.

Cuando se lanzó Landsat 5 en 1984, nadie podría haber predicho que el satélite continuaría entregando datos globales de alta calidad de las superficies terrestres durante 28 años y 10 meses, estableciendo oficialmente un nuevo récord mundial Guinness para el satélite de observación de la Tierra con más tiempo de funcionamiento " Landsat 6 no pudo alcanzar la órbita en 1993.

Landsat 7 se lanzó con éxito en 1999 y, junto con Landsat 8, que se lanzó en 2013, continúa proporcionando datos mundiales diarios. Landsat 9 tiene una fecha de preparación para el lanzamiento de diciembre de 2020 (fig. 8).

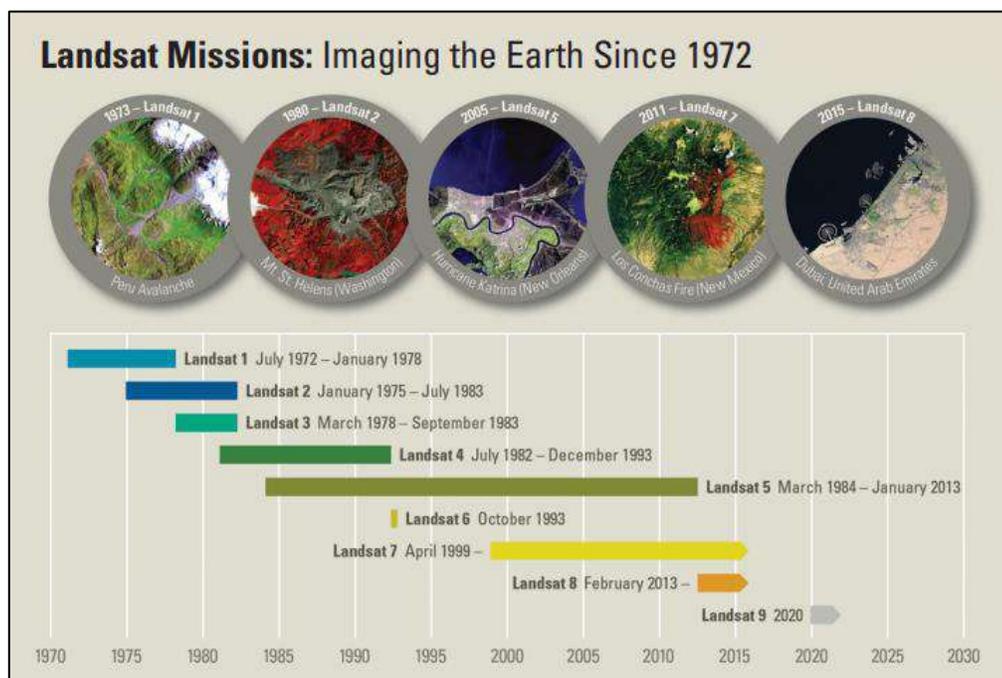


Figura No. 8 Línea de tiempo e historia de las misiones Landsat. Tomado de USGS (2016).

Los satélites Landsat 7 y Landsat 8 orbitan la Tierra a una altitud de 705 kilómetros (438 millas) en 185 kilómetros Franja (115 millas), moviéndose de norte a sur sobre el lado iluminado por el sol de la Tierra en una órbita sincrónica de sol. Cada satélite hace una órbita completa cada 99 minutos, tarda alrededor de 14 órbitas enteras por cada día, y cruza cada punto de la Tierra una vez cada 16 días (USGS, 2016).

Aunque cada satélite tiene un ciclo completo de cobertura de la Tierra de 16 días, sus órbitas están compensadas para permitir una cobertura repetida de 8 días de cualquier Área de escena de Landsat en el globo. Entre los dos satélites, más de 1,000 escenas se agregan al archivo USGS cada día. Los Landsat 4 y 5 siguieron la misma órbita que Landsat 7 y 8, mientras que los Landsat 1, 2 y 3 orbitaban a una altitud de 920 kilómetros (572 millas), dando vueltas alrededor de la Tierra cada 103 minutos, produciendo cobertura repetida cada 18 días (USGS, 2015).

Cabe hacer mención que el sistema Landsat, es el que se utilizó para el desarrollo de este proyecto, que a continuación se explica brevemente de que consta esta misión:

Con el lanzamiento de Landsat-1 el 07 de marzo de 1972, se abrió una nueva percepción del planeta con una resolución tanto temporal como espectral. Este es un satélite dotado de sensores empleados para la Percepción Remota, fue diseñado para obtener datos de los recursos naturales, y en base a este objetivo se diseñaron de acuerdo con las resoluciones para obtener dicho fin. A continuación, se describe el sensor y la plataforma satelital Landsat (Tabla 1 y Tabla 2).

Tabla 1 Características del satélite LANDSAT 5 y 7

Satélite Landsat 5-7	
Anchura de barrido	185 kilómetros
Altitud	705 kilómetros
Quantización	8 bits
Capacidad de almacenamiento a bordo	~375 Gb
Inclinación	Solar-sincrónica, 98.2 grados.
Paso ecuatorial	Descendente; 10:00 am +/-15 minutos
Vehículo de lanzamiento	Delta II
Sensores	TM (Thematic Mapper) ETM+ (Enhanced Thematic Mapper Plus)
Resolución temporal	16 días

Tabla 2 Características del satélite LANDSAT 8

Satélite Landsat 8	
Anchura de barrido	185 kilómetros
Altitud	705 kilómetros
Quantización	16 bits
Capacidad de almacenamiento a bordo	~375 Gb
Inclinación	Solar-sincrónica, 98.2 grados.
Paso ecuatorial	Descendente; 10:00 am +/-15 minutos
Vehículo de lanzamiento	Delta II
Sensores	OLI (Operational Land Imager) TIRS (Thermal Infrared Sensor)
Resolución temporal	16 días

Los datos Landsat respaldan una amplia gama de aplicaciones en áreas tales como la investigación del cambio global, la agricultura, la silvicultura, la geología, el

mapeo de la cubierta terrestre, la gestión de recursos, el agua y los estudios costeros. Actividades específicas de monitoreo ambiental tales como la investigación de deforestación, los estudios de flujo volcánico y la comprensión de los efectos de los desastres naturales se benefician de la disponibilidad de los datos de Landsat.

En los últimos años, los datos de Landsat también se han utilizado para rastrear derrames de petróleo y controlar la contaminación de los desechos mineros. La Tabla 3 enumera las bandas de Landsat y describe el uso de cada banda para ayudar a los usuarios a determinar las mejores bandas para usar en el análisis de datos.

Tabla 3. Bandas de los sensores de la misión Landsat y su aplicación.

Nombre de la banda	L8 OLI/TIRS	L7 ETM+	L4-5 TM	L4-5 MSS	L1-3 MSS	Descripción de su uso
Costero / Aerosol	Banda 1	---	---	---	---	Zonas costeras y observaciones de aguas someras; aerosol, polvo, estudios de detección de humo.
Azul (B)	Banda 2	Banda 1	Banda 1	---	---	Mapeo batimétrico; discriminación de suelo / vegetación, mapeo de tipos de bosque e identificación de características artificiales.
Verde (G)	Banda 3	Banda 2	Banda 2	Banda 1	Banda 4	Vegetación máxima; evaluaciones de vigor de planta
Rojo (R)	Banda 4	Banda 3	Banda 3	Banda 2	Banda 5	Identificación del tipo de vegetación; suelos y características urbanas
Infrarrojo cercano (NIR)	Banda 5	Banda 4	Banda 4	Banda 3	Banda 6	Detección y análisis de vegetación; mapeo costero y contenido de biomasa
	---	---	---	Banda 4	Banda 7	
Infrarrojo de onda corta 1 (SWIR-1)	Banda 6	Banda 5	Banda 5	---	---	Contenido de humedad de la vegetación / análisis de sequía; áreas quemadas y afectadas por el fuego; detección de incendios activos.
Infrarrojo de onda corta 2 (SWIR 2)	Banda 7	Banda 7	Banda 7	---	---	Detección adicional de incendios activos (especialmente en la noche); análisis de humedad / sequía de las plantas.
Panorámico (PAN)	Banda 8	Banda 8	---	---	---	Agudizar imágenes multispectrales a una resolución más alta.
Cirrus	Banda 9	---	---	---	---	Detección de nubes cirrus.
Térmica (T)	Banda 10	Banda 6	Banda 6	---	---	Estimación de la temperatura del suelo y estimaciones de las humedades del suelo
	Banda 11					

La consistencia de las adquisiciones de datos de Landsat a través de los años y la riqueza del archivo, combinadas con la política de datos sin costo, permiten a los usuarios explotar series temporales de datos en extensas áreas geográficas para establecer tendencias a largo plazo y monitorear las tasas y características de cambio en la superficie terrestre (fig. 9).



Figura No. 9 Imágenes de Landsat que muestran los archipiélagos en expansión a lo largo de la costa Dubai, Emiratos Árabes Unidos. A, octubre de 1998 (Landsat 5); B, mayo de 2003 (Landsat 7); C, mayo de 2008 (Landsat 5); y D, mayo de 2015 (Landsat 8). Tomado de USGS (2016).

1.2.1.2. Sistemas de Información Geográfica

Es una integración organizada de hardware, software y datos geográficos diseñada para capturar, almacenar, manipular, analizar y desplegar en todas sus formas la información geográficamente referenciada con el fin de resolver problemas complejos de planificación y de gestión (fig. 10), un sistema de información geográfica funciona como una base de datos con información geográfica (datos alfanuméricos) que se encuentra asociada por un identificador común a los objetos gráficos de un mapa digital. De esta forma, señalando un objeto se conocen sus atributos e, inversamente, preguntando por un registro de la base de datos se puede saber su localización en la cartografía.

Un Sistema de Información Geográfica puede ser considerado como una representación abstracta de la realidad, vinculado a un sistema de referencia terrestre y construida para satisfacer necesidades concretas de información (Moreno 2006).

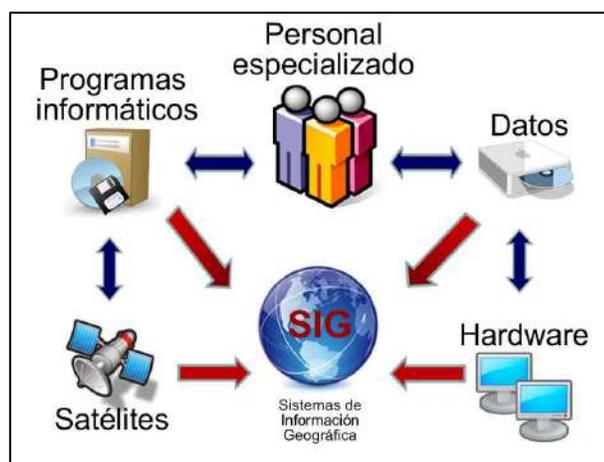


Figura No. 10 Componentes de un Sistema de Información Geográfica.

<http://www.geodesign.com.co/sigeografica.html>. Consultado el 28 de mayo de 2018.

Los componentes esenciales de un Sistema de Información Geográfica son: una base de datos para almacenar los datos geográficos y sus atributos, un sistema gestor de bases de datos, un sistema de representación cartográfica y un sistema de análisis espacial, sistemas de tratamiento de imágenes y análisis estadístico (Ordoñez et al. 2003).

- a) *Bases de datos espacial y temática.* El núcleo central del sistema lo constituyen las bases de datos espacial y temática, en las cuales se almacenan, de forma estructurada, los objetos cartográficos (posición, tamaño y forma) y sus características no geométricas (atributos), respectivamente.

- b) *Sistema Gestor de Bases de Datos (DMBS)*. Es un software usado para gestionar y analizar los datos almacenados a la base. Se pueden almacenar los datos en tablas y establecer relaciones entre ellas para crear nuevas tablas con los resultados obtenidos. Estas tablas se pueden relacionar con la base de datos espacial y representar el resultado en forma de mapas temáticos.
- c) *Sistema de digitalización de mapas*. Las bases de datos cartográficas de un SIG se construyen a partir de mapas, fotografías e imágenes que conforman los datos de partida. Para poder cargar estos datos del SIG, es necesario convertirlos al formato digital del propio sistema, para lo cual es necesario la digitalización y conversión de formatos.
- d) *Sistema de representación cartográfica*. Permiten dibujar mapas a partir de los elementos seleccionados de las bases de datos, hacer distintas composiciones cartográficas y también enviar estos mapas a los dispositivos de salida.
- e) *Sistema de Análisis Geográfico*. Este sistema permite relacionar datos espaciales y obtener nuevos mapas en función de la relación establecida.
- f) *Sistema de procesamiento de imágenes*. Algunos sistemas de información geográfica disponen de módulos para analizar y operar con imágenes obtenidas con sensores aerotransportados o desde satélites artificiales.

Los mapas son modelos de la realidad que registran de forma simplificada aquellos aspectos que más nos interesan en función del objetivo del mapa y de la escala. Se utilizan dos métodos para representar esta realidad, que da lugar a otro tipo de datos geográficos: el modelo vectorial y el modelo ráster.

Los datos de un modelo vectorial se registran en las fronteras de los objetos espaciales, aproximándolas por medio de líneas delimitadas por puntos que se localizan por sus coordenadas en un sistema de referencia. El resultado son mapas en los que parecen tres objetos cartográficos básicos: puntos, líneas y polígonos (Ordoñez et al. 2003).

El modelo ráster no registra las fronteras de los objetos, si no su contenido, quedando sus límites de manera representativa. El dominio geográfico se divide en una malla regular de celdas, normalmente cuadradas, asignando un valor a cada celda un valor numérico que representa el atributo registrado, y de acuerdo con la posición de la celda corresponde a un sistema de coordenadas cartesiano (Ordoñez et al. 2003).

1.2.1.3. Análisis espacial y modelado de procesos espaciales

Estos consisten en un conjunto de técnicas diseñadas para apoyar la perspectiva espacial de los datos. Estas técnicas van desde medidas descriptivas de los patrones de eventos hasta complejas pruebas estadísticas aplicadas que buscan ya sea comprender, explicar, gestionar o predecir eventos ocurridos en el espacio cuyos resultados dependen de la ubicación de los objetos o fenómenos analizados (Ripley 1981, Goodchild et al. 1992).

La Geomática junto con la Percepción Remota, los Sistemas de Información Geográfica, el Análisis Espacial y el Modelado de Datos Espaciales, van de la mano complementándose una con la otra, desde la recopilación de la información, el trabajarla, ajustarla, y obteniendo productos finales como son mapas e informes que eventualmente incluyen gráficos y datos geoestadísticos.

El fenómeno modelado puede brindar de manera explícita la información de la organización espacial, la localización de elementos de interés, la creación de nuevos elementos o fenómenos derivados de éste (Vázquez-Jiménez, 2011).

Goodchild et al. (1992) identifica los siguientes argumentos del análisis espacial en estudios bajo un enfoque territorial:

1. El espacio ofrece un esquema de indexación simple pero muy útil a través de la representación de la posición de elementos espaciales en mapas y sistemas de referencias y coordenadas.
2. Un enfoque espacial permite identificar el efecto de eventos u objetos a otros elementos espaciales con base a las posiciones relativas y su proximidad, siendo a menudo la distancia entre fenómenos u objetos espaciales, un factor importante de interacción.
3. El análisis espacial permite que eventos y/o elementos de distintos tipos se vinculen entre sí o con otros de distintos tipos, a través de su integración en Sistemas de Información Geográfica.

Dentro de los marcos teóricos de la Geomática, existen herramientas orientadas al análisis y modelado espacial. La Percepción Remota y la relación entre el uso del álgebra de mapas, suponen una ventaja inicial de una serie de procesos de manipulación y consulta básica de datos que las plataformas de los Sistemas de Información Geográfica permiten, para ahora modelar la información presentada en formato ráster, que permiten y facilitan el desarrollo de tareas dinámicas complejas de análisis y la simulación de fenómenos espacio-temporales que cada vez son más requeridos (Sarría 2006, Soares-Filho et al. 2009).

Hay una estrecha relación entre la Percepción Remota, los Sistemas de Información Geográfica y las herramientas de Análisis y Modelado Espacial, interactuando y complementándose entre sí bajo marcos teóricos de disciplinas específicas que estudios con fines específicos demandan; desde la adquisición de la información por sensores remotos, su posible integración en Sistemas de Información Geográfica, su análisis y modelado, concluyendo con la generación de productos finales a través de mapas, informes, gráficos o datos estadísticos; todo lo anterior dentro del marco global de la ciencia Geomática. (Vázquez-Jiménez, 2017).

1.3. La importancia de los datos

En la actualidad se debe contar con cierto tipo de insumos que sean de utilidad para expresar el paisaje; en ese sentido es preciso contar con cartografía temática cuyo uso sea la caracterización del paisaje y ver cómo ha transitado está a través del tiempo. Es por ello por lo que en los últimos tiempos se ha recurrido a la elaboración de estudios socio-ambientales con apoyo de imágenes de satélite, técnicas de la Percepción Remota, Sistemas de Información Geográfica, análisis y modelado de procesos espaciales, las cuáles son herramientas que son propicias para la elaboración de cartografía temática.

Los procesos de clasificación de imágenes de satélite han sido de gran ayuda para la elaboración de cartografía temática, sin embargo, estos procedimientos no están exentos de errores de diversos tipos, y es preciso hacer mención que incluso ese tipo de errores podría deberse a que existen altos niveles taxonómicos en la categorización de los mapas.

Es preciso hacer mención, que cada país o agencia gubernamental tienen una oficina o responsable de proveer lo esencial de la cartografía a escalas geográficas, como la local que va no mayor a 1:50,000 y continental (1:5'000,000). Es el caso de México, el organismo que provee de dicha información es el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), encargado de integrar y distribuir la cartografía de ocupación y uso de suelo a través de series temporales denominada la cartografía de vegetación y uso de suelo como *conjunto de datos vectoriales de la carta de uso de suelo y vegetación, conjunto nacional*, representado en una escala de 1:250,000.

México como país ha logrado avanzar en el análisis de la dinámica de la cubierta vegetal como base para el reporte de las tendencias y proyecciones de las tasas de deforestación. Sin embargo, este tipo de procesos deben ser validados bajo procesos estadísticamente comparables (Couturier, 2007).

En México, la información de cartografía oficial de ocupación y uso de suelo reciente corresponde a la serie VI de Uso de Suelo y Vegetación escala 1:250,000, con

fecha de referencia diciembre de 2017, pero para hacerla comparable con alguna de las fechas con las que se trabajó, se hizo uso de la serie V, que corresponde a la fecha 2011. Es preciso visualizar que la serie V no sé libra de algunas incertidumbres (fig. 11)



Figura No. 11 Posibles imprecisiones en la cartografía oficial de ocupación del suelo serie V sobre área de fotografía aérea de 2011 en el área sur de la zona de estudio correspondiente a la región centro del Estado de Guerrero.

La figura anterior muestra cartografía oficial de vegetación y uso de suelo sobrepuesta en fotografía aérea que corresponde a la misma fecha (año 2011), correspondiente al área sur de la zona de estudio que corresponde a la región centro del Estado de Guerrero. Haciendo un acercamiento a detalle se observa que existen incongruencias en dicha serie, en este caso como lo detalla la imagen, existe un polígono envolvente perteneciente a la serie V de vegetación y uso de suelo propia del INEGI, en donde el polígono de enmarcado con línea morada indica que es *Agricultura temporal anual*, sin embargo la fotografía aérea muestra que existen al interior categorías de ocupación y uso del suelo distintos (cuerpos de agua y poblaciones) que no son discriminados y categorizados.

Dichas imprecisiones pueden deberse a la representación espacial y eficiencia en la lectura del mapa impreso de acuerdo con la escala del producto, y esto se debe al principio del Área Mínima Cartografiable (AMC), el cual indica que a partir de determinada área espacial los polígonos y sus correspondientes contenidos deben ser generalizados, de lo contrario dificultarían la distinción por parte del usuario cuando se lea en formato analógico (Priego et al. 2010).

En México se ha usado de manera indistinta el AMC de 2 x 2 mm. a 6 x 6 mm. A nivel internacional, la más empleada es de 5 x 5 mm (Salitchev, 1979), pero Priego et al. (2010) indica que 4 x 4 mm es un área mínima que garantiza operatividad cartográfica y adecuada para la lectura del mapa, la tabla 4 muestra las diferentes escalas de levantamiento.

Tabla 4. Área Mínima Cartografiable para diferentes escalas (Salitchev, 1979).

Escala	1 cm igual a		1 mm igual a		Área mínima cartografiable	
	m	km	m	km	m ²	km ²
1:500	5	0.005	0.5	0.0005	4	0.000004
1:1,000	10	0.01	1	0.001	16	0.000016
1:2,000	20	0.02	2	0.002	64	0.000064
1:5,000	50	0.05	5	0.005	400	0.0004
1:10,000	100	0.1	10	0.01	1,600	0.0016
1:20,000	200	0.2	20	0.02	6,400	0.0064
1:25,000	250	0.25	25	0.025	10,000	0.01
1:50,000	500	0.5	50	0.05	40,000	0.04
1:100,000	1,000	1	100	0.1	160,000	0.16
1:250,000	2,500	2.5	250	0.25	1,000,000	1
1:500,000	5,000	5	500	0.5	4,000,000	4
1:1,000,000	10,000	10	1000	1	16,000,000	16
1:6,000,000	60,000	60	6000	6	576,000,000	576

De acuerdo con lo anterior es posible suponer que algunas cubiertas de ocupación distintas no categorizadas hayan sido generalizadas con otras categorías, como es el caso de las zonas agrícolas que siguen el principio del AMC. Es preciso mencionar que estas categorías cubren cierto impacto, y es por ello por lo que no deben excluirse totalmente; como por ejemplo los cuerpos de agua que son parte fundamental de los ecosistemas, así mismo como los asentamientos humanos que también forman para que probablemente sean agentes principales de cambios significativos.

Estas imprecisiones o la falta de información para un estudio a escala regional, la escala temporal que ofrece la cartografía oficial la mayoría de las veces resulta ser limitada y por lo tanto insuficientes para estudios que requieren el uso de fechas específicas. En México los años de referencia para la cartografía oficial de vegetación y uso de suelo son: 1985-Serie I, 1993-Serie II, 2002-Serie III, 2007-Serie IV, 2011-Serie V y 2014-Serie VI (INEGI, 2015).

En los últimos 19 años, el cambio de uso del suelo de áreas de Bosque y Selva Baja Caducifolia que se han registrado en la región centro, se debe principalmente al tipo de actividades industriales en este caso se menciona la zona minera ubicada al norte de la región, el crecimiento poblacional de la ciudad capital del estado, y entre otras como la deforestación de bosques como es el caso de las empresas madereras; son algunas de las principales prácticas que han ido disminuyendo las cubiertas vegetales y haciendo la transformación del paisaje deteriorando el medio ambiente.

Los beneficios de monitorear el uso del suelo son importantes, ya que con ello es posible observar las tendencias del crecimiento de la población, identificar necesidades de desarrollo e infraestructura, cuantificar áreas agrícolas y cuáles son las zonas afectadas por la pérdida de bosques, selvas, ríos, lagos y ecosistemas en general (Nájera-Valle et al. 2018).

1.4. Hipótesis

Bajo los antecedentes planteados, la hipótesis propuesta es:

“Es posible desarrollar una metodología para obtener cartografía de ocupación y uso de suelo, aplicando los modelos de conocimiento y herramientas geotecnológicas propias de la ciencia Geomática y a su vez eventualmente pueda ser utilizada para conocer y evaluar los cambios de ocupación y uso de suelo, en la región centro del Estado de Guerrero”

CAPÍTULO II. METODOLOGÍA

2.1. Zona de estudio

México, junto con China, India, Colombia y Perú se encuentra entre los cinco países llamados “megadiversos”, los cuales en conjunto albergan entre el 60% y 70% de la diversidad biológica conocida del planeta. Prácticamente todos los tipos de vegetación terrestres conocidos se encuentran representados en el país, y algunos ecosistemas, como los humedales de Cuatro Ciénegas en Coahuila sólo se encuentran en México. Este tipo de diversidad es dado al resultado de su topografía y geología, complementándose con sus diversos climas y microclimas que se encuentran en el territorio mexicano (CONABIO, 2008).

En cuanto a su flora y fauna, México ocupa el primer lugar en el mundo en riqueza de reptiles, el segundo en mamíferos y el cuarto en anfibios y plantas. La diversidad biológica de nuestro país se caracteriza por estar compuesta de un gran número de especies endémicas. Aproximadamente el 50% de las especies de plantas que se encuentran en el territorio son endémicas, esto se traduce en aproximadamente 15,000 especies que, si desaparecieran en México, desaparecerían del planeta. Los reptiles y anfibios tienen una proporción de especies endémicas de 57% y 65%, respectivamente y los mamíferos (terrestres y marinos) de 32%. (CONABIO, 2008).

Chiapas, Veracruz, Oaxaca y Guerrero encabezan los estados con mayor biodiversidad (CONABIO, 2008, La Jornada Guerrero, 2010). Sin embargo, el desarrollo económico, los cambios de uso del suelo, el crecimiento urbano y la explotación de los recursos naturales han originado fuertes presiones sobre los sistemas naturales desmejorando los problemas de deforestación, erosión, contaminación, cambio de actividades económicas y productivas, desplazamiento de pobladores locales, entre otros (Mas et al. 2012).

El Estado de Guerrero cuenta con una extensión de 63,596 km² e históricamente sus recursos naturales han estado siendo explotados, degradando los ecosistemas y transformando sus paisajes, esto al ser uno de los estados que posee una abundante biodiversidad, es así que sufre cierto tipo de amenazas que hacen que se pongan en peligro cierto tipo de ecosistemas que lo componen, por cierto tipo de actividades que son desarrolladas dentro de ellos por mano del hombre como son las actividades industriales, campos de cultivo, expansión de la población, incendios, y otros fenómenos que de cierto tipo no son causados por el ser humano, pero son del tipo ambiental como los fenómenos naturales, en este caso los fuertes torrenciales provocando el desbordamiento de ríos y la erosión del suelo (Congreso del Estado de Guerrero, 2013).

El área de estudio es la zona centro del Estado de Guerrero, con una extensión de 10,686 km², conformada por 13 municipios: General Heliodoro Castillo, Leonardo Bravo, Chilpancingo de los Bravo, Juan R. Escudero, Mochitlán, Quechultenango, José Joaquín de Herrera, Chilapa de Álvarez, Tixtla de Guerrero, Eduardo Neri, Mártir de Cuilapan, Zitlala y Ahuacuotzingo. (fig. 12).

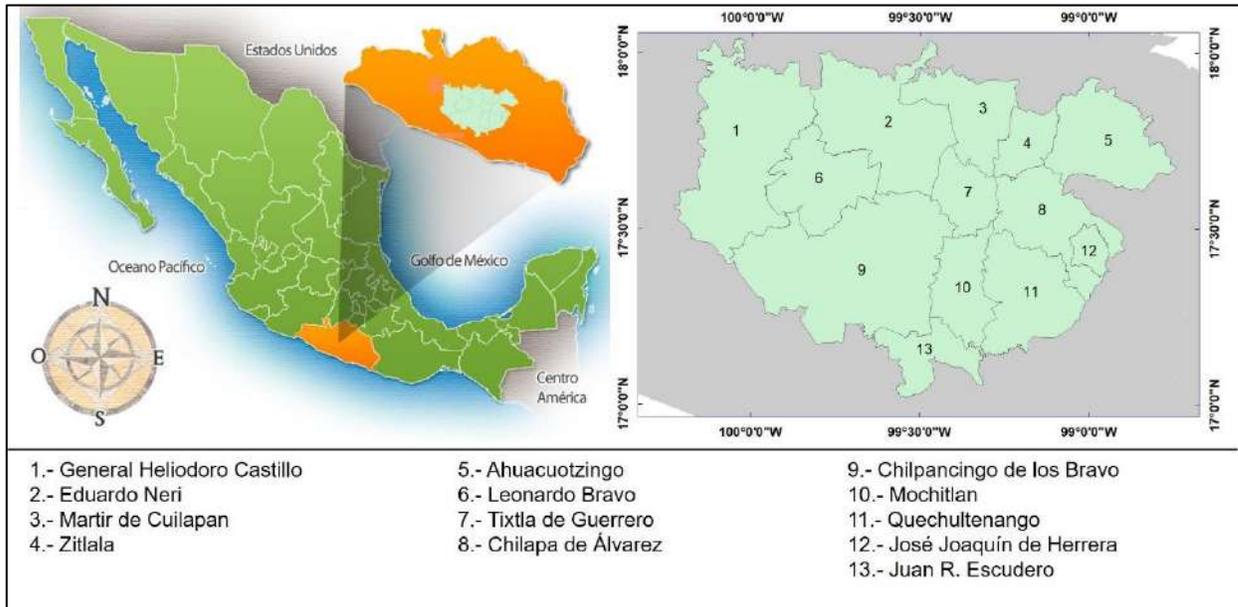


Figura No. 12 Ubicación de la zona de estudio.

Las cifras oficiales de la serie V de uso de suelo y vegetación del INEGI registran que la zona de estudio tiene una distribución de ocupación y uso del suelo de 43.8% de bosque (conífero, mesófilo y mixto), 39.3% de selva baja caducifolia, 8.2% de uso agropecuario, 6.7% de vegetación inducida, 1.7% de asentamientos humanos y zonas urbanas, 0.2% de cuerpos de agua y 0.1% de suelo desnudo (INEGI, 2015a).

La zona de estudio cuenta con una gran variedad de valles con elevaciones desde los 280 hasta los 2800 m sobre el nivel medio del mar, con una temperatura promedio anual de 25°C, esta región se encuentra en la parte central de la entidad, con límites territoriales hacia el norte con la región Norte, al sur con la región Acapulco y parte de las regiones de Costa Chica y Costa Grande, al oriente con la región Montaña y al poniente con la región Tierra Caliente (INEGI, 2015a).

La flora del área compuesta por la depresión del Balsas que comprende a la selva baja caducifolia que se integra por especies como *Bursera simaruba* (chaka, palo mulato); *Bursera* sp. (cuajote, papelillo, copal, chupandia); *Lysiloma* sp. (tsalam, tepeguaje); *Jacaratia mexicana* (bonete); *Ceiba* sp. (yaaxche, pochote); *Ipomoea* sp. (cazahuate); *Leucaena leucocephala* (waxim, guaje); *Bursera odorata* (copal) y *Brahea dulcis* (palma de sombrero), y posteriormente en las serranías de la Sierra Madre del Sur como es

bosque complementado por especies del tipo pino (*Pinus spp*), Encino (*Quercus spp*) (INEGI, 2015a).

En la zona también se desarrollan actividades agrícolas, preferencialmente del lado norte-orientado, actividades del tipo industrial como son las zonas mineras ubicadas al norte. En el centro del área de estudio se encuentra la ciudad capital de la entidad; así mismo como cuerpos de agua por mencionar algunos de ellos la laguna de Tixtla, laguna de Palo Blanco, parte de las vertientes del río Balsas y Papagayo.

Su fauna es diversa y se integra por especies animales como conejo, iguana, tejón, zorrillo, mapache, puma, venado, zopilote, zanate, tortolita, paloma, gavilán, perico, guacamaya, puerco espín, armadillo y liebre, donde son especies que predominan más sobre el área (INEGI, 2015a).

2.2. Conjunto de datos

2.2.1. Datos primarios

Para el desarrollo del presente estudio, los insumos primarios utilizados fueron:

Cartas topográficas

21 cartas topográficas topográfica a escala 1:50,000 con información de curvas de nivel a cada 20 m de precisión vertical, proporcionadas por el Instituto Nacional de Geografía y Estadística de México (INEGI). En la tabla 5 se detallan las cartas topográficas utilizadas (INEGI, 2015b).

Tabla 5 Detalles del conjunto vectorial topográfico a escala 1:50,000.

CLAVE	NOMBRE	EDICIÓN
E14A86	Villa Hidalgo	2015
E14C16	Tetela del Río	2015
E14C26	La Primavera	2016
E14C36	El Paraíso	2016
E14A87	Apaxtla de Castrejón	2015
E14C17	Tlacotepec	2015
E14C27	Chichihualco	2016
E14C37	Jaleaca	2016
E14C47	Xaltianguis	2015
E14A88	Santa Teresa	2015
E14C18	Xochipala	2015
E14C28	Chilpancingo	2015
E14C38	Mazatlán	2015
E14C48	Tierra Colorada	2015
E14C19	Zicapa	2015
E14C29	Chilapa	2015
E14C39	Quechultenango	2015
E14C49	Colotepec	2015
E14D11	Olinalá	2015
E14D21	Ahuacuotzingo	2015
E14D31	Potoichán	2015

Carta de uso de suelo y vegetación

El INEGI ha elaborado cartas de uso de suelo y vegetación a través del departamento de uso de suelo a partir del año 1996, en diferentes versiones y escalas. Utilizando el análisis analógico y posteriormente digital; contiene información que fue obtenida a partir de la fotointerpretación de imágenes del sensor Landsat 5-TM.

Los trabajos de fotointerpretación están apoyados con muestras de campo, con información de ubicación, extensión de diferentes comunidades, así como sus usos agrícolas e información ecológica relevante. Hasta el momento son 6 series disponibles de la página oficial de INEGI con las fechas de referencia que se muestran en la tabla 6.

Tabla 6 Series y años de referencia de la información de uso de suelo y vegetación del INEGI

Serie	I	II	III	IV	V	VI
Año de referencia	1985	1993	2002	2007	2011	2014

La información de uso de suelo y vegetación viene en una escala de 1:250,000, cuenta con 6 cubrimientos a los que se le denomina series, las cuáles van desde la Serie I hasta la Serie VI, esta se obtiene a partir de la interpretación visual de las imágenes Landsat multiespectral. Presenta varios tipos de distribución de vegetación natural e inducida, así como el uso que se le da al suelo, como lo son las zonas agrícolas (INEGI, 2015).

La Serie V de vegetación y uso de suelo, con respecto a la región centro del Estado de Guerrero, comprende de 36 clases de uso y ocupación (fig. 13).

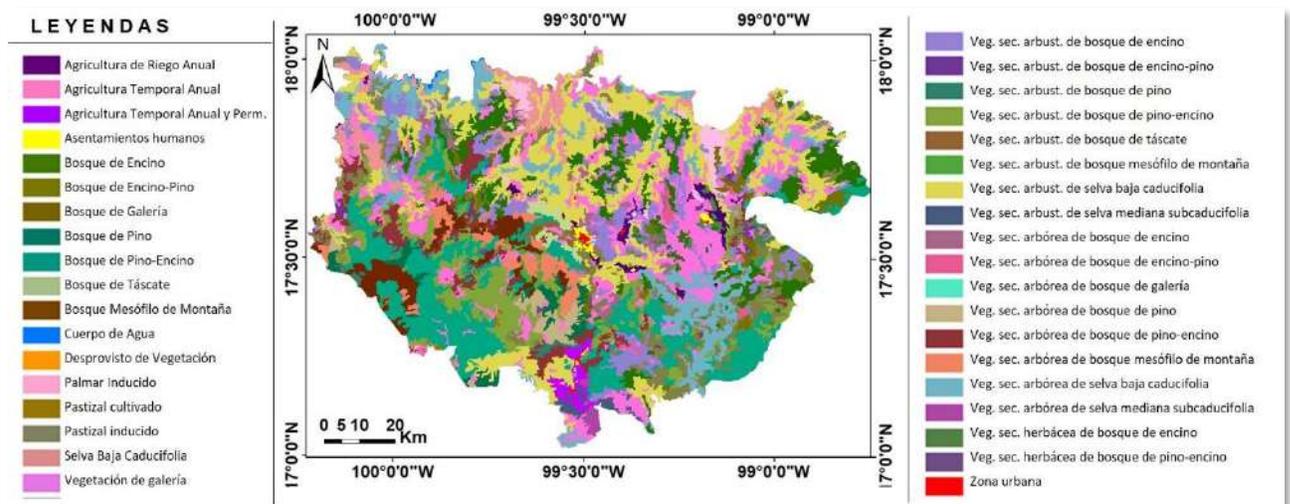


Figura No. 13 Serie V de Uso de suelo y vegetación correspondiente a la zona de estudio

Imágenes satelitales

Para este estudio se utilizaron 3 imágenes Landsat obtenidas del sitio web del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS) con valores de Reflectancia de Superficie (SR), correspondientes al Path 26, Row 48, del Word Reference System (WRS-2), en la tabla 7 se muestra en resumen las fechas y las bandas utilizadas entre distintos sensores, las cuales son totalmente comparables entre sí, para este caso se excluyeron las bandas térmicas.

Tabla 7 Sensores, fechas y bandas de las imágenes consideradas para el estudio.

SENSOR	FECHA	BANDAS
Landsat 7 ETM+ <i>Enhanced Thematic Mapper Plus</i>	Marzo 21 – 2000	1-Azul, 2-Verde, 3-Rojo, 4-Infrarrojo cercano-1, 5-Infrarrojo cercano-2, 7-Infrarrojo medio
Landsat 5 TM <i>Thematic Mapper</i>	Febrero 24 – 2011	
Landsat 8 OLI-TIRS <i>Operational Land Imager – Thermal Infrared Sensor</i>	Enero 29 – 2019	2-Azul, 3-Verde, 4-Rojo, 5-Infrarrojo cercano, 6-Infrarrojo de onda corta-1, 7-Infrarrojo de onda corta-2

2.2.2. El sistema Landsat

El sistema Landsat cuenta con un registro continuo de datos multiespectrales en imágenes con una resolución de 30 m desde el año 1972 (Schroeder et al. 2006) hasta la fecha en distintas plataformas, siendo actualmente la serie con más temporalidad de información proporcionada por los sensores satelitales. Su aplicación ha facilitado la comprensión de los procesos que ocurren sobre la superficie terrestre a través del tiempo (Cohen, Goward 2004, Mishra et al. 2014) (fig. 14).

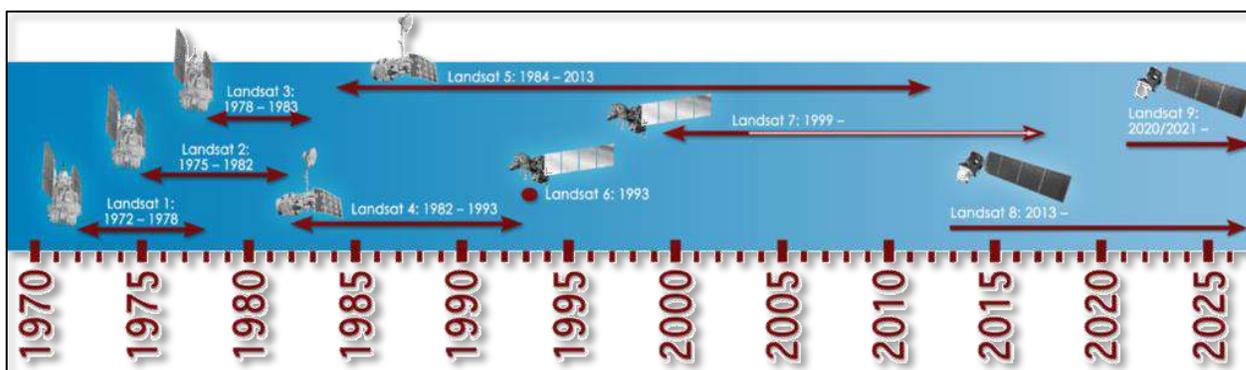


Figura No. 14 Línea de tiempo del sistema Landsat.

Fuente: https://ciaf.igac.gov.co/sites/ciaf.igac.gov.co/files/files_ciaf/Herrera_Vargas_Nicolas.pdf

Para el desarrollo de este estudio, se trabajó con 3 sensores, pertenecientes al sistema Landsat, se detallan a continuación algunas características propias del sistema (MARTINEZ-GIRON, 2015).

- *Landsat 5 (TM)*. Durante la fecha del 1 de marzo de 1984, la NASA lanzó Landsat 5, el último satélite de la agencia asignado originalmente por Landsat. Landsat 5 fue diseñado y construido al mismo tiempo que Landsat 4 y con la misma carga útil: el Sistema de Escáner Multiespectral (MSS) y los instrumentos Thematic Mapper (TM). El instrumento MSS se apagó en agosto de 1995. Ha sido el sensor con más tiempo en órbita.
- *Landsat 7 (ETM+)*. Fue lanzado con éxito el 15 de abril de 1999, desde el Western Test Range de la Base de la Fuerza Aérea Vandenberg, California, en un vehículo de lanzamiento desechable Delta-II. El instrumento de observación de la Tierra en Landsat 7, Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+), replica las capacidades de los instrumentos Thematic Mapper de gran éxito en Landsats 4 y 5. Así como también incluye características adicionales que lo convierten en un instrumento más versátil y eficiente para estudios de cambio global, monitoreo y evaluación de la cobertura terrestre y mapeo de áreas grandes que sus antecesores de diseño.
- *Landsat 8 (OLI-TIRS)*. Se lanzó el 11 de febrero de 2013. La carga útil del satélite Landsat 8 consiste en dos instrumentos científicos: el Operational Land Imager (OLI) y el Thermal Infrared Sensor (TIRS). Estos dos sensores proporcionan una cobertura estacional de la masa terrestre global a una resolución espacial de 30 metros (visible, NIR, SWIR); 100 metros (térmico) y 15 metros (pancromático) desarrollado en colaboración NASA y Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS).

Entre las ventajas que presentan estos sensores, se pueden apreciar:

- Mediante las distintas plataformas que posee, ofrece un registro continuo de los cambios que han ocurrido en superficie desde 1972, siendo la serie más larga en la recolección sistemática de datos de Percepción Remota.
- La resolución espacial que ofrece de 30 m en las imágenes es muy importante para estudios de ocupación y uso y/o cobertura de suelo.
- La resolución temporal es de 16 días, esto da la facilidad de poder escoger entre dos escenas al menos al mes, lo que es importante porque la escena que pudiese elegir estaría en óptimas condiciones.
- Los sensores Landsat 5 Thematic Mapper (TM), Landsat 7 Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+) y Landsat 8 Operational Land Imager-Thermal InfraRed Sensor (OLI-TIRS), adquieren registros en distintos rangos del espectro electromagnético: visible, infrarrojo cercano (IRC) onda corta infrarroja (IROC)

(tabla 4). Landsat 8 proporciona una mejora de los instrumentos e incorpora dos nuevas bandas espectrales: un canal profundo en el azul visible y un canal infrarrojo adicional (Banda 1 y 9 respectivamente) (Ariza 2013, Knight, Kvaran 2014).

Las características generales de las imágenes de los sensores Landsat 5 Thematic Mapper (TM), Landsat 7 Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+) y Landsat 8 Operational Land Imager-Thermal InfraRed Sensor (OLI-TIRS) se muestra en la tabla 8.

Tabla 8 Características de los sensores L5 (TM), L7 (ETM+) y L8 (OLI-TIRS). http://Landsat.usgs.gov/band_designations_landsat_satellites.php (Consultado el 11 de mayo de 2018).

SENSOR	MODO ESPECTRAL	RESOLUCIÓN ESPACIAL (M)	RESOLUCIÓN ESPECTRAL (MICRAS)		RESOLUCIÓN RADIOMÉTRICA (BITS)	RESOLUCIÓN TEMPORAL (DÍAS)
L5 (TM)	Multiespectral	30	B1 Azul	0.45-0.52	8	16
			B2 Verde	0.52-0.60		
			B3 Rojo	0.63-0.69		
			B4 IRC1	0.76-0.90		
			B5 IRC2	1.55-1.75		
			B7 IRM	2.08-2.35		
	Termal	120	B6 IRT	10.4-12.5		
L7 (ETM+)	Multiespectral	30	B1 Azul	0.45-0.52	8	16
			B2 Verde	0.52-0.60		
			B3 Rojo	0.63-0.69		
			B4 IRC1	0.77-0.90		
			B5 IRC2	1.55-1.75		
			B7 IRM	2.09-2.35		
	Pancromático	15	B8 PAN	0.52-0.90		
Termal	120	B6 ITR	10.4-12.5			
L8 (OLI-TIRS)	Multiespectral	30	B1 Coast Aerosol	0.43-0.45	16	16
			B2 Azul	0.45-0.51		
			B3 Verde	0.53-0.59		
			B4 Rojo	0.64-0.67		
			B5 IRC	0.85-0.88		
			B6 IROC1	1.57-1.65		
			B7 IROC2	2.11-2.29		
	Pancromática	15	B8 PAN	0.50-0.68		
	Multiespectral	30	B9 Cirrus	1.36-1.38		
	Termal	100	B10 IRT1	10.6-11.9		
			B11 IRT2	11.5-12.51		

2.2.2.1. Imágenes Landsat de Reflectancia de superficie con corrección atmosférica.

Las imágenes satelitales de Landsat han sido producidas, archivadas y distribuidas por el U.S. Geological Survey (USGS) desde 1972, asimismo el Sistema Mundial de Observación del Clima, USGS tienen a la tarea de ofrecer productos de excelente nivel, para poder brindar soporte a los estudios de superficie terrestre. Estos productos son denominados Climate Data Records (CDR), con una resolución espacial de 30 metros. Un producto CDR es generado a partir de un software especializado llamado “Landsat Ecosystem Disturbance Adaptive Processing System” (LEDAPS); este software en un principio fue desarrollado por la National Aeronautics and Space Administration (NASA) y la Universidad de Maryland (Masek et al. 2006).

Para los sensores Landsat TM o ETM+, el software aplica las rutinas de corrección atmosférica del sensor Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) a los datos Landsat. La información de vapor de agua, ozono, altura geopotencial, espesor óptico del aerosol y la elevación digital, son datos que junto con la información Landsat se introducen al modelo de transferencia radiativa denominado *Second Simulation of a Satellite Signal in the Solar Spectrum* (6S) para generar los valores de: reflectancia en el sensor (Top of Atmosphere-TOA), reflectancia de la superficie, térmico y máscaras de nubes, sombras de nubes y nubes-tierra-agua adyacentes. Esta información es ofrecida como reflectancia de superficie Landsat CDR (USGS, 2015a).

Para el caso del sensor Landsat 8 OLI-TIRS, la reflectancia de superficie se genera a partir del Código de Reflectancia de Superficie Landsat (LaSRC), que utiliza la banda de aerosol costero para realizar pruebas de inversión de aerosol, utiliza datos climáticos auxiliares de MODIS y utiliza un modelo único de transferencia radiativa. LaSRC codifica el ángulo cenital de la vista a "0", y el cenit solar y los ángulos cenitales de la vista se utilizan para los cálculos como parte de la corrección atmosférica (USGS, 2015b).

Entre de los productos que el USGS ofrece para las imágenes SR, se encuentra una alternativa muy útil, es una imagen donde ya vienen identificadas las nubes y sus sombras, la banda con la cual es fácil identificarlas para los procesos que así lo requieran. Estas bandas están nombradas como cloud_qa (nube) y cloud_shadow_qa (sombra de nube).

2.3. Resumen general de la metodología

La siguiente figura representa la esquematización de la metodología desarrollada a lo largo del proyecto de investigación (fig. 15)

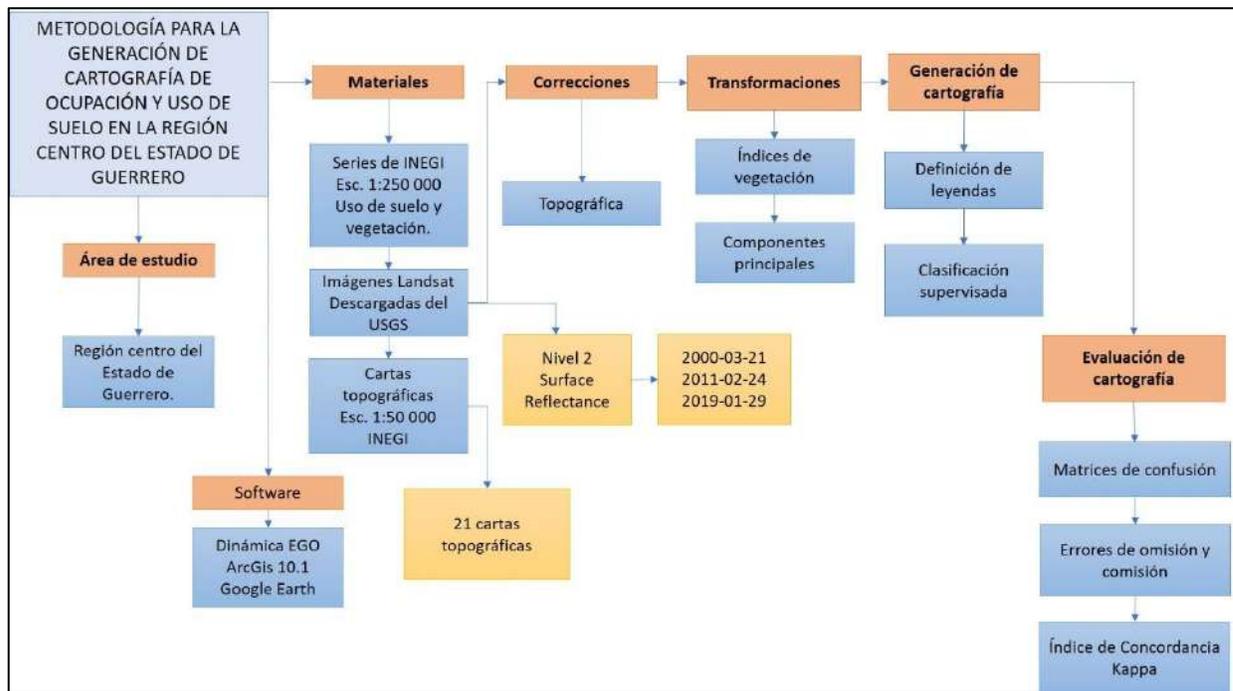


Figura No. 15 Esquema de la metodología general para la generación de cartografía de ocupación y uso de suelo.

A continuación, se describe de manera general las etapas de que involucran el proceso metodológico:

1. Obtención de los datos primarios: Se obtuvieron los datos que se mencionaron con anterioridad, directamente de los proveedores de información y/o plataformas web oficiales.
2. Preprocesamiento: A partir de la información vectorial de las cartas topográficas, se generó un Modelo Digital de Elevación (MDE) del área de estudio, con resolución de 30 metros para que se trabaje con las imágenes de satélite Landsat.
Obtenido el MDE, se generaron mapas de pendientes y orientación del terreno. A partir de las imágenes Landsat que fueron obtenidas del tipo SR, se obtuvieron con mascara de nubes y sombras para las fechas consideradas.
3. Corrección topográfica: Con el objeto de eliminar el efecto de sombras causadas por el relieve topográfico y la posición del sol al momento de la toma de la imagen, se aplicó corrección topográfica por el método Sun Canopy Sensor + C a las imágenes Landsat.
4. Transformación de imágenes: Se generaron imágenes adicionales mediante el proceso de transformación de Análisis de Componentes Principales (CP) y se calcularon los Índices de Vegetación (NDVI).
5. Generación de Cartografía de ocupación y uso de suelo: Definición de las leyendas que integrarán la cartografía, en donde se toma como base las

leyendas que utiliza INEGI, las cuáles a su vez se discriminan en un grupo más pequeño. Se realizó una revisión general de todas las categorías de ocupación dentro de la serie V, donde se agrupó en categorías de interés de la zona con respecto a las características distintivas de la vegetación.

Aplicación del método de clasificación supervisada Máxima Verosimilitud, el cual consiste en integrar la verdad terreno, el apoyo de esta verdad terreno tendrá peso, pues en este paso se realizan polígonos en donde este se dividirá en dos grupos los cuales serán 1) 2/3 para clasificar y 2) 1/3 reservado para validar, ambos grupos los pixeles son seleccionados aleatoriamente.

Posteriormente se seleccionan las bandas que serán utilizadas para el proceso de clasificación las cuales en conjunto con la verdad terreno para clasificar y se obtiene un mapa final clasificado y depurado.

Eliminación del efecto sal pimienta, consiste en agrupar pixeles y dirigirlo a que categorías pertenecerán de acuerdo con sus características, y posteriormente se obtiene como resultado un mapa final clasificado y depurado.

6. Evaluación de la cartografía de ocupación y uso de suelo. En este paso, como su nombre lo menciona se evalúa la cartografía que se generó en el paso anterior se realizan matrices de confusión, en donde se cruza información el mapa final clasificado y depurado con la información que fue reservada para validación, en este caso 1/3 de la verdad terreno.

Así mismo, se obtuvieron errores de comisión y omisión, así como los aciertos de productor y usuario.

Para finalizar se analizaron los índices de concordancia Kappa para saber el grado de confiabilidad del mapa.

Cabe hacer mención que para el desarrollo de alguno de los procesos que se enunciaron con anterioridad, se desarrollaron modelos en Dinámica EGO, la cuál es una sofisticada plataforma basada en autómatas celulares usada para el modelado de los procesos ambientales y que cuenta con herramientas de análisis y simulación de fenómenos a través del tiempo y el espacio, que permite el desarrollo de modelos complejos que permite el desarrollo de modelos, incluyendo iteraciones anidadas, multi-transiciones, realimentación, enfoque multi-escala y multi-región y procesos de decisión (Soares-Filho et al. 2002, Soares Filho et al. 2009, CSR-UFGM 2016) (fig. 16), y en ArcGIS, que es un software especializado en el tratamiento de información geográfica, cuya función es el análisis, tratamiento, diseño e impresión de información espacialmente referenciada. Además de recopilar, organizar, administrar, compartir y distribuir información para análisis detallados (ESRI, 2017).

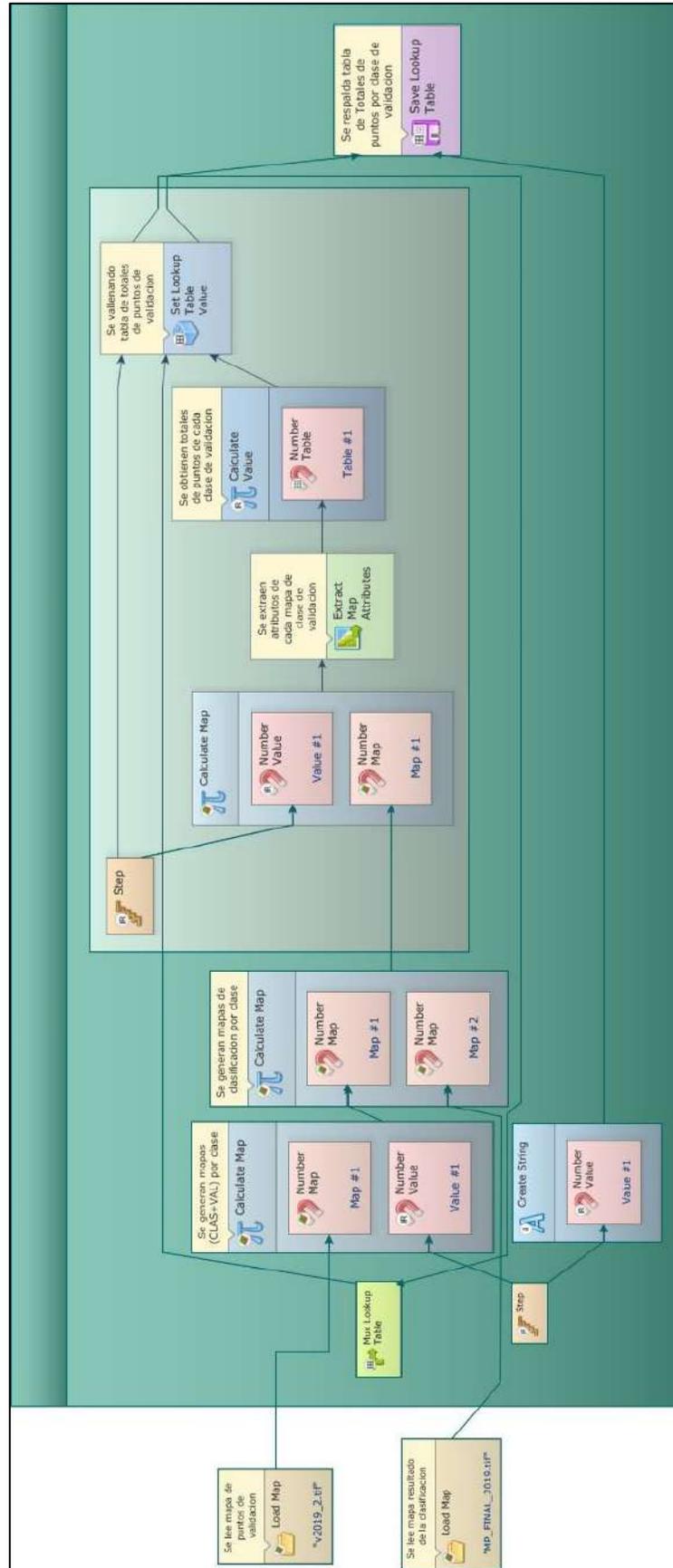


Figura No. 16 Ejemplo de un modelo desarrollado con el programa Dinámica EGO.

2.4. Pre procesamiento

2.4.1. Modelo Digital de Elevación (MDE) y mapas derivados

El Modelo Digital de Elevación (MDE), es la representación visual y matemática de los valores de altura con respecto al nivel medio del mar (INEGI, 2017). Para la generación de este MDE, se partió de la información vectorial de curvas de nivel con 20m de precisión vertical, contenida en las cartas topográficas del INEGI, con una resolución espacial de 30 m que corresponde a la resolución espacial de las imágenes Landsat.

Para la generación del MDE, se realizó la descarga de la plataforma INEGI el conjunto de 21 cartas topográficas las cuales cubren la zona de estudio. Posteriormente se manipularon en ArcGis específicamente el dato vectorial de curvas de nivel, posteriormente se creó una red irregular de triángulos del terreno (TIN¹).

Una vez elaborado el TIN se procedió a la conversión en formato ráster² del MDE; en esta etapa se define el tamaño del píxel, es decir, la resolución espacial del modelo, en la cual se asignó un valor de 30 m, dada la correspondencia existente de las imágenes Landsat, la transformación se realizó con la herramienta *Tin to raster*, así mismo el MDE resultante se recortó y alineó con la imagen de una fecha base establecida como la banda 1 (B1) del 21-Marzo-2000, esto con el fin de que el modelo tenga correspondencia pixel a pixel (georreferencia) y en el tamaño de la imagen MDE resultante en función de la imagen base (fig. 17).

¹ Una Red Irregular de Triángulos o TIN (por sus siglas en ingles), es un medio digital para representar la morfología de la superficie. Es una forma de datos geográficos digitales basados en vectores y se construyen mediante la triangulación de un conjunto de vértices (puntos). Los vértices están conectados en forma de serie aristas para formar una red de triángulos (ESRI, 2017).

² Formato ráster consta de una matriz de celdas (píxeles) organizadas en filas y columnas, en la que cada celda contiene un valor que representa información, entre los ráster se encuentran las imágenes de satélite, fotografías aéreas, entre otros.

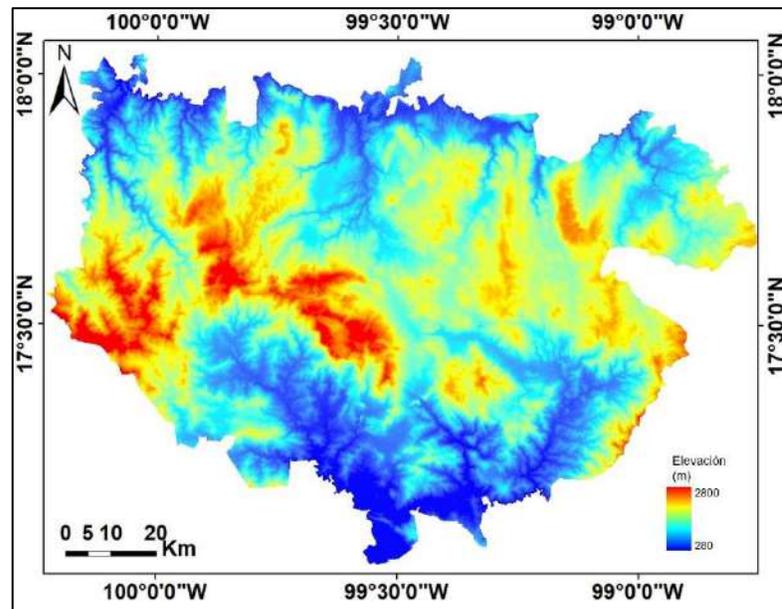


Figura No. 17 Modelo Digital de Elevación (MDE) de la zona de estudio.

A partir del MDE se generó un mapa de pendientes (en grados), que fue tratado en ArcGis con la herramienta de análisis espacial *Slope*, con una resolución espacial de 30 metros por píxel, en el cual se identificaron las pendientes máximas y mínimas de la zona de estudio (fig. 18).

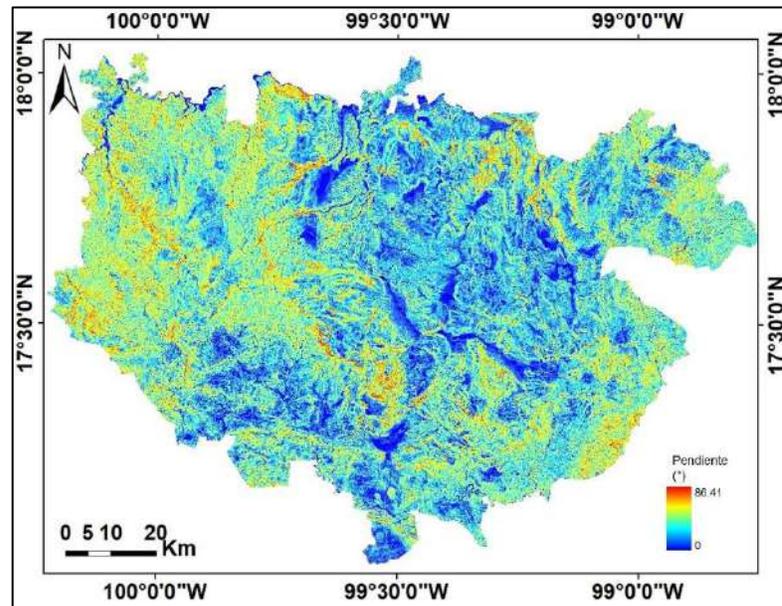


Figura No. 18 Mapa de pendientes de la zona de estudio.

Los valores de elevación obtenidos a partir del MDE permitieron la creación del mapa de pendientes, cuyos rasgos son establecidos a través del análisis de perfiles topográficos; se calcula la tasa de cambio máxima en Z entre cada celda y sus vecinas.

El cálculo se realiza con la función gradiente, es decir, las diferencias de alturas vs. diferencias de distancias.

La pendiente, cumple un papel importante para la corrección topográfica, porque forma parte del cálculo del parámetro C porque se le incorpora un mapa con clasificación de pendientes topográficas de la zona de estudio, en este caso para zonas montañosas, en donde el considerar la pendiente mejora la eliminación del efecto de sombras y relieve, especialmente para áreas con pronunciada pendiente (Vázquez-Jiménez et al., 2017).

Para la generación del mapa de orientación del terreno, se partió del MDE a través de la herramienta Aspect, el cuál identifica la dirección de las pendientes descendientes de la tasa máxima de cambio de valor de cada célula a sus vecinos más cercanos. Los valores que muestra el mapa reflejan la dirección del azimut en sentido de las horas del reloj de la pendiente iniciando a partir del Norte (Romero-Rojas, 2017) (fig. 19)

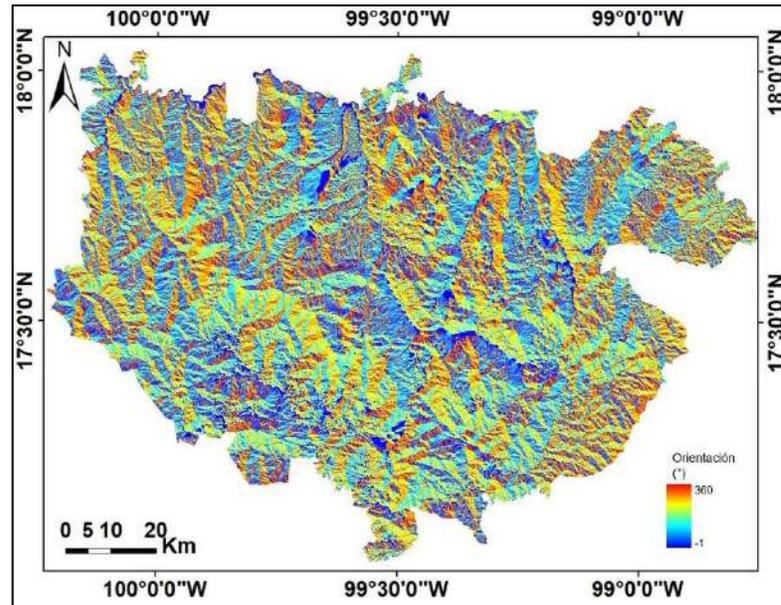


Figura No. 19 Mapa de orientaciones del terreno de la zona de estudio.

Este mapa de orientaciones del terreno servirá como soporte para la corrección topográfica, debido a que indica los ángulos de inclinación y orientación del terreno en combinación con la geometría solar cuando es el momento de adquisición de la imagen satelital. Cuando son áreas montañosas donde las superficies son inclinadas directamente orientadas hacia donde los rayos solares reciben más luz, las imágenes aparecen más brillantes contrario a aquellas superficies que no reciben esta luz directamente (Vázquez-Jiménez et al., 2017).

2.5. Corrección topográfica a las imágenes satelitales por el método SCS+C por clasificación de pendientes.

El hecho de trabajar con imágenes de satélite que sean confiables y proporcionen información detallada, es hasta cierto punto un poco arduo, debido a que las escenas están limitadas por los efectos que causa la irradiancia espectral directa y difusa a causa de los cambios de pendiente y el ángulo de orientación del terreno con respecto a la geometría del sol al momento que se toma la imagen; es por ello, que estas deben de ser tratadas en donde se elimine el efecto topográfico en las imágenes satelitales para el desarrollo de estudios de Percepción Remota (Proy et al., 1989).

Existen diversos métodos de corrección topográfica entre los cuales están Coseno, Minnaert, C-Corrección y estadístico; todos ellos aplicados y estudiados (Uribe et al. 2006).

El modelo Sun Canopy Sensor, es uno de los apropiados al aplicarlo para zonas montañosas o forestales como la zona de estudio donde sus pendientes van desde los 300 hasta los 2800 msnm, y su tipo de vegetación es variada forestalmente, es un método basado en la respuesta espectral del suelo, anteponiendo la naturaleza geotrópica del crecimiento de los árboles (Vázquez-Jiménez, 2017).

Soenen et al. (2005) establecieron el método de corrección topográfica SCS+C, incorporando el parámetro C al método SCS original (Gu, Gillespie, 1998) para caracterizar mejor la irradiancia difusa atmosférica. El modelo se expresa:

$$Ln = \frac{L(\cos\theta_p \times \cos\theta_i + C)}{\cos\theta_i + C} \quad (1)$$

Donde:

Ln : reflectancia normalizada equivalente de una superficie plana,

L : dato de radiancia medida por el sensor

θ_p : pendiente del terreno

θ_i : ángulo cenital solar

C : parámetro semi-empírico de corrección

El parámetro C se obtiene con la ecuación $C=b/m$; donde b representa la intersección y m la pendiente de la línea de regresión obtenida por la relación entre el coseno del ángulo solar de incidencia (iluminación) como variable independiente, y los datos espectrales (reflectancia) como variable dependiente.

El coseno del ángulo solar incidente ($\cos i$), se determinó mediante la ecuación (Holben, Justice 1980, Smith et al. 1980, Ge et al. 2008):

$$\cos i = \cos \theta_p \cos \theta_i + \sin \theta_p \sin \theta_i \cos(\phi_a - \phi_0) \quad (2)$$

$\cos i$: Iluminación

ϕ_a : azimut solar

ϕ_0 : ángulo de orientación del terreno.

El objetivo de este método consiste en eliminar el efecto de las sombras en la imagen ocasionadas por el relieve topográfico. Esta corrección se aplica para cada una de las bandas de todas las fechas a usar. Esto facilita la identificación de las cubiertas de ocupación y uso de suelo mediante técnicas de clasificación supervisada (Vázquez-Jiménez, 2017; Soenen et al. 2005; Gu, Gillespie 1998).

Los cambios de pendiente y las variaciones de cobertura terrestre en las zonas montañosas, causan efectos sobre la iluminación y la radiación reflejada. Este hecho teóricamente afecta la determinación del parámetro de corrección topográfica; es decir, la aplicación de un parámetro de corrección global único no puede producir una corrección topográfica precisa para todos los rangos de pendientes de escena (Ramos-Bernal, 2018).

De forma que, en lugar de hacer un solo cálculo del parámetro C de manera global, este se hace de manera individual, es decir de banda por banda, como se realiza en la aplicación del método de corrección SCS+C; en donde propone desarrollar el cálculo de varios parámetros C diferenciados por la pendiente del terreno (Vázquez-Jiménez et al. 2017).

Para la aplicación del modelo de SCS+C, se sometieron a corrección topográfica las 3 escenas Landsat, con las fechas y características que se muestran en la tabla 7, en donde indica las bandas con valores de reflectancia a corregir con excepción de la pancromática.

Para la generación de las imágenes corregidas atmosféricamente se procedió a la generación de dos insumos más que fueron generados a partir del conjunto vectorial topográfico que proporciona INEGI, con el cuál se generó el MDE, los cuales fueron un mapa de pendientes y mapa de orientación del terreno, obtenidos a partir de la aplicación de las herramientas que proporciona el software cartográfico como es *Slope* para pendientes y *Aspect* para orientación.

Las mascara de nubes, como así fue denominada, es una integración de las bandas Cloud_qa y Cloud_shadow_qa, donde se unificaron para su valoración, dada que

algunas de ellas presentaban algunas incongruencias, a lo cuáles se sometieron a una exploración visual dentro del ArcGis en la cual en algunas zonas hubo presencia de ellas y no fueron reconocidas se digitalizaron y caso contrario, para así obtener una máscara en óptimas condiciones, la realización de los procesos de integración de máscara de nubes se realizaron dentro del software de Dinámica EGO.

Las imágenes satelitales no están exentas de la presencia de nubes, de este modo, para algunas fechas de estudio hubo presencia de nubes en las imágenes (Mar-2000, Feb24-2011 y Ene29-2019) a las que se les consideró incluir una máscara como una capa adicional para excluir los píxeles de nubes y sus sombras dentro del proceso de corrección topográfica, así como también dentro de la clasificación.

La integración de las ecuaciones 1 y 2, se modeló Dinámica EGO, en donde se conjuntaron los insumos necesarios para su desarrollo (escenas de la zona de estudio, MDE, mapa de pendientes, mapa de orientación del terreno y máscara de nubes).

2.6. Transformación de imágenes

Para el desarrollo del proyecto, una vez que se obtuvieron las imágenes corregidas topográficamente, fue necesario diferenciar distintos tipos de información que a su vez fueran de utilidad en el desarrollo del proceso de clasificación. En este sentido, se generaron las siguientes imágenes adicionales.

2.6.1. Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada

Una de las aplicaciones de la Percepción Remota es identificar los patrones de distribución de las cubiertas de vegetación en el suelo mediante la generación de índices de vegetación, así como la identificación, evaluación y monitoreo de la dinámica de los cambios temporales de estas cubiertas (Baig et al. 2014).

Los índices de vegetación son medidas cuantitativas, basada en los valores que tienden a medir la biomasa o vigor vegetal. Estos índices han sido usados en una variedad de contextos para evaluar la biomasa como en los climas áridos, y en la evaluación el riesgo de la degradación del suelo (Campbell, 1987).

La reflectividad de las cubiertas vegetales viene determinada por las características ópticas y distribución espacial de todos sus constituyentes, incluyendo a el suelo sobre el que se sienta la vegetación.

Los índices de vegetación se definen como un parámetro calculado a partir de los valores de la reflectividad a distintas longitudes de onda y que pretende extraer de los mismos la información relacionada con la vegetación minimizando la influencia de las

perturbaciones como las debidas al suelo y a las condiciones atmosféricas (Gilbert M.A., et al 1997) y ha sido descrito por Jackson et al. 1983 como aquel que particularmente es sensible a la cubierta vegetal, insensible al brillo y color del suelo y poco afectado por la perturbación atmosférica, los factores medioambientales y las geometrías de la iluminación y de la observación.

Los índices basados en el tipo de pendientes están basados en combinaciones aritméticas simples que se enfocan en la respuesta espectral de la vegetación de las porciones del rojo y del infrarrojo del espectro electromagnético, dentro de ellos se encuentran: de Diferencia Normalizada (NDVI), Transformado (TVI), Transformado Corregido (CTVI), Transformada de Tiam (TTVI), Cociente simple (RVI) y Normalizado (NRVI); sin embargo, en este caso aplicaremos el NDVI (Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada) (Gómez Almonte, 2012).

Este índice minimiza los efectos topográficos, su escala va de -1 a +1, con el valor de cero representado el aproximado donde empieza la ausencia de vegetación, y los valores negativos representan las superficies sin vegetación. Se obtiene aplicando la ecuación número 3.

$$NDVI = \frac{(NIR - R)}{(NIR + R)} \quad (3)$$

Donde:

NDVI: Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada

NIR: Reflectancia corregida atmosféricamente correspondiente al infrarrojo cercano.

R: Reflectancia corregida topográficamente correspondiente al Rojo.

El cálculo del NDVI se obtuvo por medio de un modelo de algebra de mapas en el software Dinámica EGO.

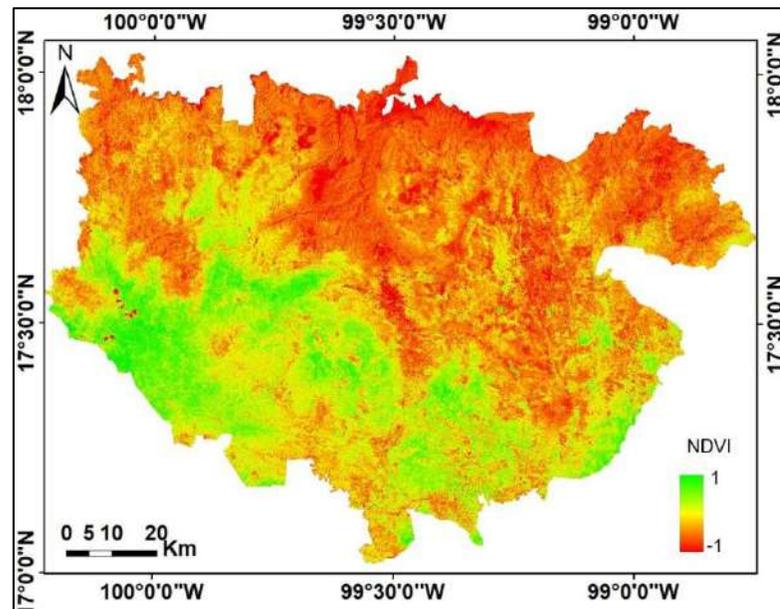


Figura No. 20 Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) correspondiente a la fecha 24 de febrero de 2011.

2.6.2. Análisis de Componentes Principales

El proceso de análisis de Componentes Principales (CP) tiene como objetivo resumir un grupo amplio de variables en un nuevo conjunto más pequeño sin perder significativamente la información original (Chuvienco, 2010). Esto incrementa la posibilidad de diferenciar los cambios continuos entre diferentes fechas, ya que al reducir la dimensionalidad de los datos se incrementa la eficiencia de los resultados.

También es usado en aplicaciones multitemporales con el objeto de detectar cambios en distintas fechas (Ferrero, S.B. et al. 2002).

El primer componente principal tendrá la varianza más grande, el segundo mostrará la segunda varianza más grande no descrita por el primero y así sucesivamente. Por lo general, los primeros tres o cuatro ráster del juego de bandas de la herramienta de componentes principales describirán más del 95 por ciento de la varianza. Las bandas de ráster individuales restantes se pueden eliminar. Debido a que el nuevo ráster multibanda contiene menos bandas, y más del 95 por ciento de la varianza del ráster multibanda original está intacto, los cómputos serán más rápidos, y la exactitud se mantendrá (ESRI, 2017).

Tabla 9. Porcentaje y Acumulativo de EigenValues obtenidos para la fecha Ene29-2019.

PC Layer	EigenValue	Percent of EigenValues	Accumulative of EigenValues
1	0.00173	76.0230	76.0230
2	0.00043	18.9044	94.9274
3	0.00009	3.8054	98.7328
4	0.00002	0.7725	99.5053
5	0.00001	0.3779	99.8832
6	0.00000	0.1168	100.0000

De acuerdo con la tabla anterior, se pueden visualizar que el porcentaje de los valores extraídos son b1:76.0230%, b2:18.9044%, b3:3.8054%, b4:0.7725%, b5:0.3779% y b6:0.1168%; entonces, a partir de estos porcentajes se seleccionan los primeros 3 componentes principales, es decir retienen un 98.7328% de la varianza original de la imagen.

Las bandas a las cuales se les aplicaron CP para cada fecha para el sensor TM fueron la 1 (Azul), 2 (Verde), 3 (Rojo), 4 (Infrarrojo cercano), 5 (Infrarrojo medio) y 7 (Infrarrojo térmico); mientras que para el sensor OLI fueron la 2 (Azul), 3 (Verde), 4 (Roja), 5 (Infrarrojo cercano), 6 (Onda corta infrarroja 1) y 7 (Onda corta infrarroja 2), mediante el software ArcGis, de los cuáles se ocuparon los 3 primeros componentes principales (fig. 21).

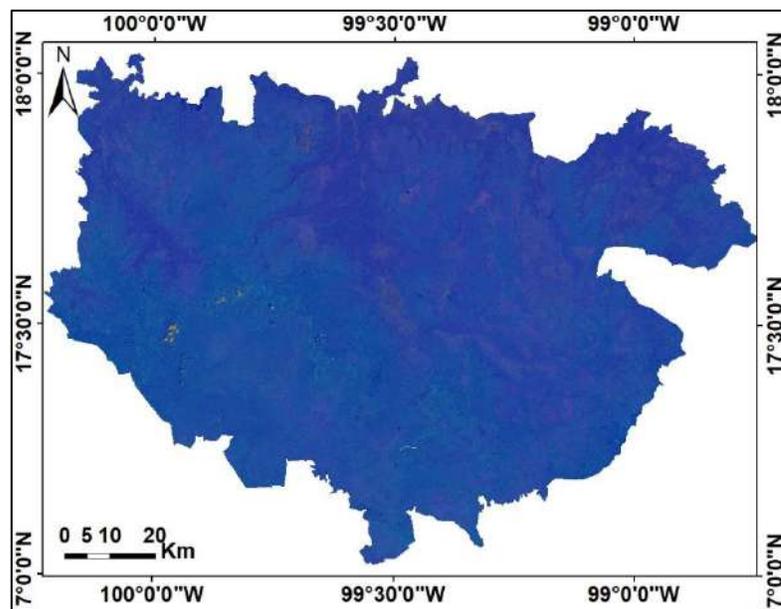


Figura No. 21 Imagen multibanda de los componentes principales de la fecha 29 de enero de 2019 de la zona de estudio.

2.7. Generación de cartografía

Una de las actividades de la Percepción Remota, es la realización de estudios, donde los insumos básicos principales son imágenes de satélite, donde por ende el resultado de ellos es plasmar información de manera cartográfica.

En este apartado, el objeto es generar cartografía de ocupación y uso de suelo, para cada una de las fechas consideradas desarrollándose por procesos de clasificación supervisada, para lo cual es preciso contar con información que muestre la verdad terreno con la que se pretende identificar las categorías de ocupación, y a partir de ello desarrollar una serie de pasos que procederán a la generación de cartografía de ocupación y uso de suelo.

La cartografía oficial de ocupación y uso de suelo que dispone INEGI, sólo es para fechas específicas, y el no contar para otras fechas de interés, resulta inconveniente para el desarrollo de ciertos estudios.

Es preciso mencionar que al hacer comparaciones (fig. 22) de la fecha correspondiente al año 2011 de la serie V con una imagen satelital del año correspondiente muestra algunas imprecisiones; es así que analizándola visualmente puede decirse que la zonas de color morado (zona agrícola) y rojo (suelo desnudo) son clases pertenecientes propias de la cartografía oficial, sin embargo, la imagen del mismo año correspondiente muestra que en realidad no corresponde, puesto que pertenece a suelo desnudo, probablemente el INEGI al desarrollar su cartografía tienen diferentes criterios de clasificación de categorías, y probablemente a esto se deba parte de las imprecisiones.

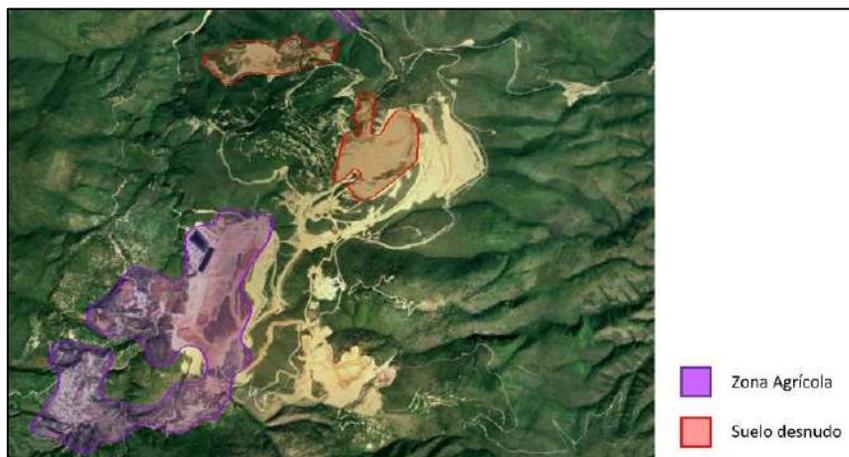


Figura No. 22 Probables imprecisiones en la Serie V de la cartografía oficial de uso de suelo y vegetación sobre fotografía aérea correspondiente al año 2011. Zona norte de la región centro del Estado de Guerrero.

Es probable que estas imprecisiones se deban a la relación que existe representar espacialmente y la lectura del mapa impreso de acuerdo con la escala del producto, en donde es aplicable el principio del AMC, en donde el contenido de información y los polígonos se generalizan a partir de cierta cantidad de superficie.

2.7.1. Clasificación supervisada

La clasificación de imágenes sigue causas análogos a los que se emplean en fotointerpretación. En esta técnica, en primer lugar, el intérprete identifica el patrón visual asociado a cada cubierta, de acuerdo con una serie de criterios: tono, textura, forma, contexto, disposición, etc. Posteriormente, delimita sobre el resto de las fotografías las zonas que se corresponden con ese modelo previamente definido (Chuvieco, 2010). En otras palabras, asigna a cada categoría unas determinadas superficies, en función de la semejanza de estas con el patrón-tipo identificado previamente. Por último, verifica sobre el terreno la interpretación realizada.

Durante la clasificación digital se obtiene una cartografía e inventario de las categorías de estudio. De acuerdo con Cihlar et al. (1998), un método de clasificación debería de contar con las siguientes características: 1) fiable; 2) reproducible por otros, dadas las mismas variables de entrada; 3) robusto (no sensible a los pequeños cambios en las condiciones de entrada, aunque permita explorar enteramente la información de esas variables); 4) exhaustivo, que cubra todo el territorio de estudio, y 5) objetivo, que no esté marcado por las decisiones del interprete (Chuvieco, 2010).

En un principio la clasificación digital no busca una definición absoluta de cada cubierta, que pudiera ser aplicable a cualquier imagen, sino más bien una caracterización relativa, válida para una determinada imagen y un territorio concreto (Robinove, 1981).

El método supervisado parte de un conocimiento previo del terreno, a partir del cual se seleccionan las muestras para cada una de las categorías, es el más habitual, por cuanto se identifican sobre unos fotogramas tipo las características de cada clase, para luego poder delimitar en el resto las zonas que más se ajustan; y por otra, el método no supervisado procede a una búsqueda automática de grupos de valores homogéneos dentro de la imagen, es decir, en primer lugar identificaría sobre la fotografía las zonas homogéneas en cuanto a tonos, textura, disposición, etc., para luego asignarlas a una de las clases temáticas establecidas en la leyenda (Idrisi Manual Selva, 2012).

Con la clasificación supervisada, uno provee una descripción estadística del modo en el que se espera que ciertas coberturas terrestres aparezcan en la imagen, y luego se usa un procedimiento, conocido como clasificador, para evaluar la probabilidad de que cada píxel pertenezca a cada una de estas clases (Idrisi Manual Selva, 2012). El proceso

de la clasificación puede interpretarse como uno que determina el grupo al que cada píxel pertenece.

Respecto a la distribución, conviene tener en cuenta las propias características de la imagen, intentando abarcar las variaciones espaciales que se presentan en cada categoría: pendiente, orientación, densidad, vigor, contenido de humedad, tipo de suelo, etc. La variabilidad de una cubierta es directamente proporcional a la de un sensor (Chuvieco, 2010; Cushine, 1987).

2.7.2. Clasificador Gaussiano de Máxima Verosimilitud (Maximum Likelihood Classifier)

Entre los métodos de clasificación más generalizados se pueden mencionar la clasificación híbrida, mínima distancia, paralelepípedos, gaussiano de máxima verosimilitud, entre otros.

El método de Máxima Verosimilitud es una de las técnicas más común y aplicado en estudios de Percepción Remota por los resultados que ofrece, este evalúa cuantitativamente tanto la varianza como la covarianza. Esto permite calcular la probabilidad de que un píxel pertenezca a esa categoría, conociendo sus valores en las distintas capas empleadas a clasificar. El cálculo se realiza para todas y cada una de las categorías que intervienen en la clasificación, asignando al píxel a aquella que maximice la función de probabilidad (Chuvieco, 2010).

Para ello se asume que la información espectral en el seno de cada categoría de información definida en la etapa de entrenamiento es Gaussiana (normalmente distribuida), lo cual permite describir completamente cada categoría por una función de probabilidad a partir de su vector de medias y matriz de varianza-covarianza. Esta función asemeja la distribución real de la información espectral dentro de cada categoría y por tanto es útil para calcular la probabilidad de que un píxel pertenezca a una de las categorías. Este proceso se realiza para cada categoría y en la clasificación se asigna cada píxel a aquella categoría que maximice la función de probabilidad (Chuvieco, 2010).

Existe una lógica para realizar el procedimiento de una clasificación supervisada, la cual consiste en: 1. Definir los sitios de entrenamiento, 2. Extraer firmas, 3. Clasificar la imagen y 4. Validar la clasificación.

2.7.3. Definición de leyendas de ocupación y uso de suelo

Para la definición de las leyendas de las categorías de ocupación y uso del suelo que resultan de interés, se conjuntó con expertos locales en la materia, en donde se hizo

una revisión general de la presencia de las categorías de ocupación y uso de suelo, tomadas de la Serie V de la cartografía oficial de uso de suelo y vegetación (INEGI, 2015).

Para la definición de las categorías de ocupación a ser representadas en el trabajo, se propuso una reclasificación de las cubiertas agrupándolas por sus características distintivas, similares, su capacidad de ser discriminadas espectralmente y la capacidad de poder ser representadas a una escala regional.

Los análisis generales desarrollados para la definición de las leyendas finales se enlistan a continuación en la tabla 10:

Tabla 10 Reclasificación de las categorías de la Serie V de Uso de Suelo y Vegetación.

Clases Serie V INEGI	Clasificación propuesta
Desprovisto de vegetación	1. Suelo desnudo
Asentamientos humanos, zonas urbanas	2. Asentamientos humanos
Bosque de: encino, pino, encino-pino, pino-encino, galería, táscate, mesófilo de montaña. Vegetación secundaria arbustiva de bosque de encino, pino, pino-encino, encino-pino, galería, mesófilo de montaña. Vegetación secundaria herbácea de: pino, encino, pino-encino, encino-pino, mesófilo de montaña.	3. Bosque
Cuerpos de agua	4. Cuerpos de agua
Agricultura de riego anual, temporal, anual, temporal anual y permanente.	5. Agrícola
Palmar inducido, selva baja caducifolia, vegetación secundaria arbustiva y herbácea de selva baja caducifolia, Pastizal inducido y pastizal cultivado.	6. Selva Baja Caducifolia

La figura 23 muestra algunos ejemplos generales y a detalle de las cubiertas de ocupación identificadas para la zona de estudio.

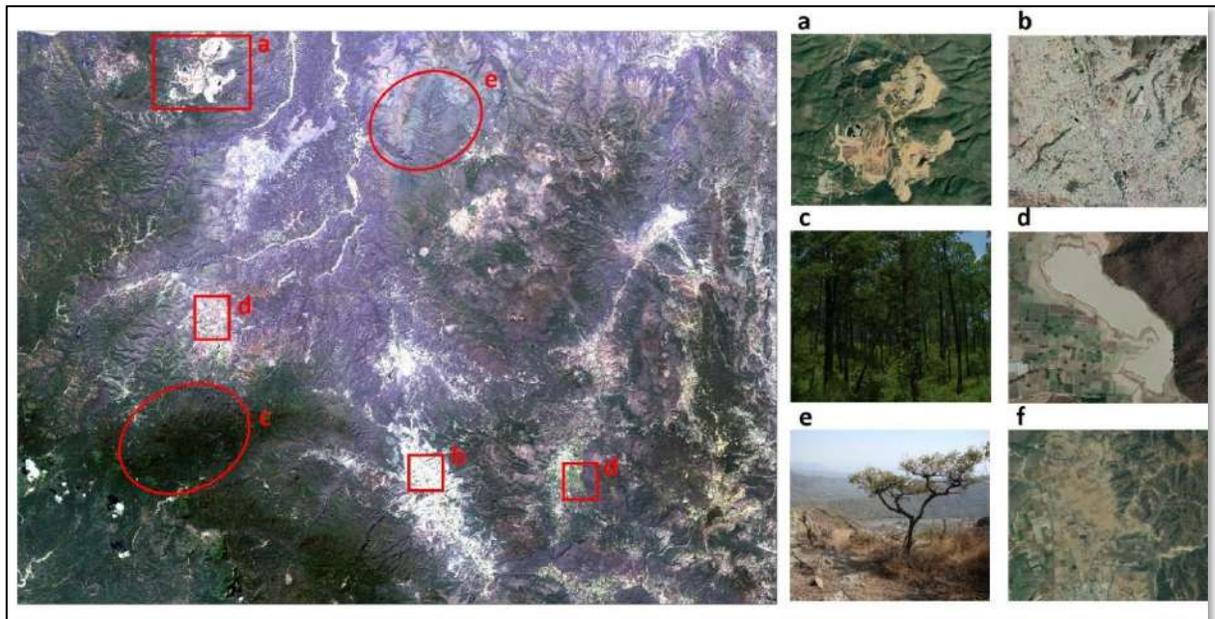


Figura No. 23 Identificación general de las categorías de ocupación y uso de suelo en la zona de estudio. a) Suelo desnudo, b) Asentamientos humanos, c) Bosque, d) Cuerpos de agua, e) Selva baja caducifolia y f) Agrícola.

En las zonas indicadas (en color rojo), se identifican muestras de las categorías de interés, dichas zonas no son exclusivas donde se puede encontrar los tipos de cobertura de ocupación indicados, como podrá constatarse en los mapas de ocupación resultantes.

2.7.4. Integración de la verdad terreno.

Entrenamiento y validación

La clasificación digital se inicia caracterizando los patrones que definen a la imagen en las distintas categorías objetivo, es decir, se trata de definir con cierto rigor cada una de las categorías que pretendan discriminarse, teniendo en cuenta su propia variabilidad en la zona de estudio (Chuvienco, 2010).

En esta etapa los polígonos de verdad terreno, debe ser seleccionados minuciosamente, además este procedimiento ayuda reducir los trabajos de campo, es decir, en esta fase es obtener los resultados más precisos con los mínimos costes (Chuvienco, 2010).

A partir de las seis categorías ocupación y uso de suelo reclasificadas, se digitalizaron polígonos de verdad terreno distribuidos en la zona de estudio (fig. 23) para las distintas fechas. Los polígonos se verificaron mediante fotointerpretación con imágenes disponibles en la plataforma *on-line* Google Earth de fechas cercanas a la de

la imagen Landsat. Estos polígonos de verdad terreno fueron utilizados para la etapa de entrenamiento y validación del proceso de clasificación.

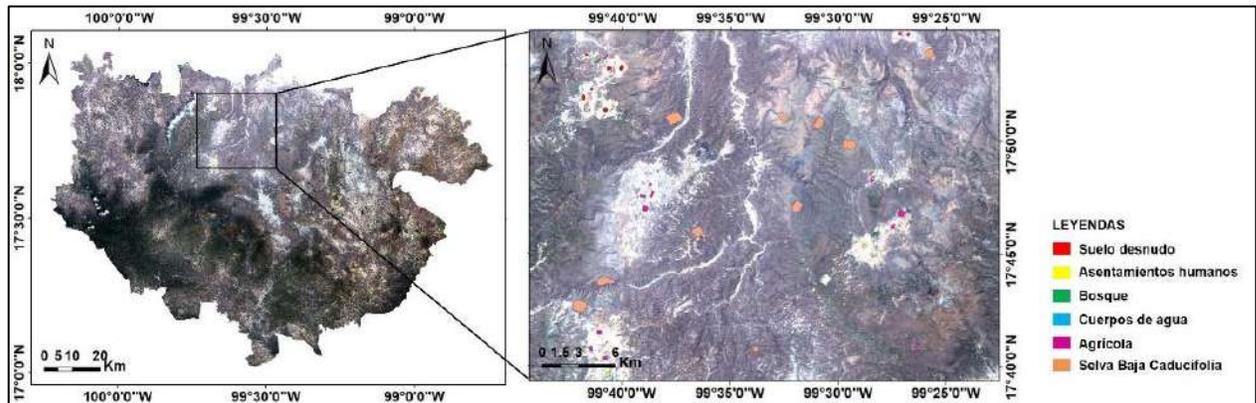


Figura No. 24 Polígonos de verdad terreno resultantes de la digitalización de la fecha (febrero 24, 2011).

En la figura anterior se muestra una digitalización de la integración de la verdad terreno, en la cual se hace un acercamiento previo de la zona de estudio en la parte superior de la zona, en donde se trata de digitalizar zonas que integren las clases propuestas.

Para la aplicación del proceso de clasificación y posteriormente la validación, estos píxeles fueron separados en dos grupos: el primero equivaldrá a 2/3 de la verdad terreno que será considerado para entrenar el modelo de clasificación, el segundo grupo se conformará de 1/3 de píxeles y estos serán reservados para evaluar la precisión final del proceso de clasificación. La separación se realizó de manera aleatoria para las 3 fechas a trabajar, obteniendo las siguientes distribuciones en las tablas 11, 12 y 13.

Tabla 11 Organización aleatoria de la verdad terreno para la fecha Mar-21-2000 por categoría de ocupación y uso de suelo en píxeles a usar en el entrenamiento en el modelo de clasificación y píxeles a usar para validar la precisión de la clasificación.

Identificación	Descripción	Píxeles para clasificar	Píxeles para validar	Totales
1	Suelo desnudo	99	50	149
2	Asentamientos humanos	2317	1159	3476
3	Bosques	18580	9290	27870
4	Agua	974	487	1461
5	Agrícola	8674	4337	13011
6	Selva baja caducifolia	17488	8744	26232
Totales		48133	24066	72199

Tabla 12 Organización aleatoria de la verdad terreno para la fecha Feb-24-2011 por categoría de ocupación y uso de suelo en pixeles a usar en el entrenamiento en el modelo de clasificación y pixeles a usar para validar la precisión de la clasificación.

Identificación	Descripción	Pixeles para clasificar	Pixeles para validar	Totales
1	Suelo desnudo	911	456	1367
2	Asentamientos humanos	2039	1020	3059
3	Bosques	22541	11270	33811
4	Agua	919	459	1378
5	Agrícola	6781	3391	10172
6	Selva baja caducifolia	17757	8879	26636
Totales		50949	25474	76423

Tabla 13 Organización aleatoria de la verdad terreno para la fecha Ene-29-2019 por categoría de ocupación y uso de suelo en pixeles a usar en el entrenamiento en el modelo de clasificación y pixeles a usar para validar la precisión de la clasificación.

Identificación	Descripción	Pixeles para clasificar	Pixeles para validar	Totales
1	Suelo desnudo	1691	845	2536
2	Asentamientos humanos	2424	1212	3636
3	Bosques	21317	10659	31976
4	Agua	967	483	1450
5	Agrícola	7912	3956	11868
6	Selva baja caducifolia	19597	9798	29395
Totales		53907	26954	80861

Aplicación del proceso de clasificación

Es preciso hacer mención que antes de iniciar el proceso de clasificación, y posteriormente de haber obtenido las leyendas de ocupación y uso de suelo, se analizaron las bandas de reflectancia normalizada, el Modelo Digital de Elevación y transformaciones desarrolladas como los Análisis de Componentes Principales, Índices de Vegetación, se concluyó a el planteamiento de las siguientes afirmaciones:

En el análisis de los componentes principales, los primeros componentes concentran la mayor parte de información común de las seis capas de reflectancia, incluyendo la varianza; por lo tanto, no es necesario ocupar toda la información, si no solamente las 3 primeras bandas de los componentes, así se tendría la información general de las capas de ocupación de ocupación y uso de suelo de interés.

El NDVI nos muestra información relacionada con las cubiertas de vegetación (presencia, ausencia, salud, entre otros), es por ello, que resulta de suma importancia anexar este tipo de índices.

Y por último incorporar el MDE, enriquece de varias formas la información a clasificar, en donde de acuerdo con cada cierto tipo de vegetación como son los bosques que son caracterizados por su presencia o ausencia en ciertos rangos de elevaciones y de otro modo los asentamientos humanos, zonas agrícolas o selva baja caducifolia se caracterizan por ser zonas de poca pendiente.

Es así, que para integrar el modelo de clasificación es necesario integrar capas de información: 1.- El MDE, 2.- El NDVI y 3.- Los 3 componentes principales, es decir 5 capas de información por cada una de las fechas a clasificar.

Esta información, en conjunto se integra al algoritmo de clasificación, en dónde la información de la verdad terreno contenida se pretende utilizar 2/3 partes de los píxeles para entrenar, como se muestra en las tablas 10, 11 y 12 (Vázquez-Jiménez, 2017) dentro del método de clasificación de Máxima Verosimilitud.

Cabe mencionar que se consideraron las máscaras de nubes como una capa adicional, no precisamente para la clasificación, sino para excluir los píxeles de las nubes y sombras del proceso de clasificación; de esta forma, se realizaron máscaras de nubes-sombras para las 3 fechas (Mar21-2000, Feb24-2011 y Ene29-2019), y así los mapas resultantes no se vean afectados por este motivo en la etapa de la evaluación de la precisión de la clasificación.

Al aplicar el proceso de clasificación, resulta una imagen a la cual es necesario aplicar una depuración para eliminar el efecto conocido como *sal-pimienta*, con el fin de reasignar los píxeles clasificados en alguna categoría aislada diferente a la que prevalece a su alrededor y de acuerdo a una superficie mínima establecida, sean incluidos en estas. De esta forma los mapas clasificados mejoran su presentación.

Para este la aplicación del proceso de depuración, se aplicó la propuesta de Vázquez-Jiménez (2017), quien establece que con apoyo de expertos en se establezca la superficie mínima recomendable de los píxeles que pueden ser agrupados en cada una de las categorías en función de su integración en los ecosistemas locales y considerando además el principio del área mínima cartografiable (Salitchev 1979, Priego et al. 2010), para que estos sean representados de manera adecuada a una escala regional o local; en este sentido, en este trabajo se consideró lo siguiente.

1.- Para las grandes extensiones de ocupación, como son las categorías de Bosques y Selva baja caducifolia, que los grupos de píxeles a depurar sean inferiores a 20 píxeles, es decir a áreas que corresponden a los 18,000 m² de superficie.

2.- Para el resto de las categorías, consideradas como pequeños grupos, por su tipo de extensión, zonas como suelo desnudo, asentamientos humanos, cuerpos de

agua, se depuren grupo de píxeles con tamaño inferior a los 10 píxeles, es decir, áreas con superficie de 9,000 m².

De esta forma, los tamaños resultan superiores que el área mínima cartografiable a una escala local.

El proceso de depuración del efecto *sal-pimienta* se desarrolló por medio de un modelo en algebra de mapas, de manera automatizada la depuración, el cual se muestra en la (fig. 25).

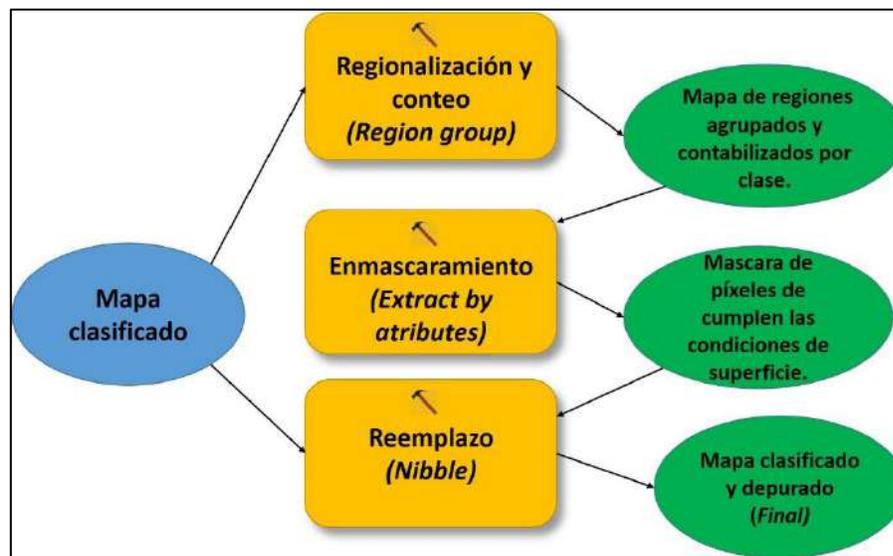


Figura No. 25 Modelo de depuración del efecto *sal-pimienta*.

- 1) Realiza una regionalización de la imagen clasificada en la cual se agrupan y contabilizan los píxeles unidos en la misma categoría.
- 2) Genera una máscara de los píxeles que cumplen las condiciones de superficies mínimas establecidas (<20 píxeles para bosques y selvas o <10 para el resto de las categorías).
- 3) Finalmente se reemplazan en la imagen clasificada, lo píxeles seleccionados y enmascarados en la etapa anterior con valores digitales de los píxeles colindantes.

El proceso de clasificación supervisada por el método de Máxima Verosimilitud quedará integrado como se muestra en el siguiente esquema (fig. 26).

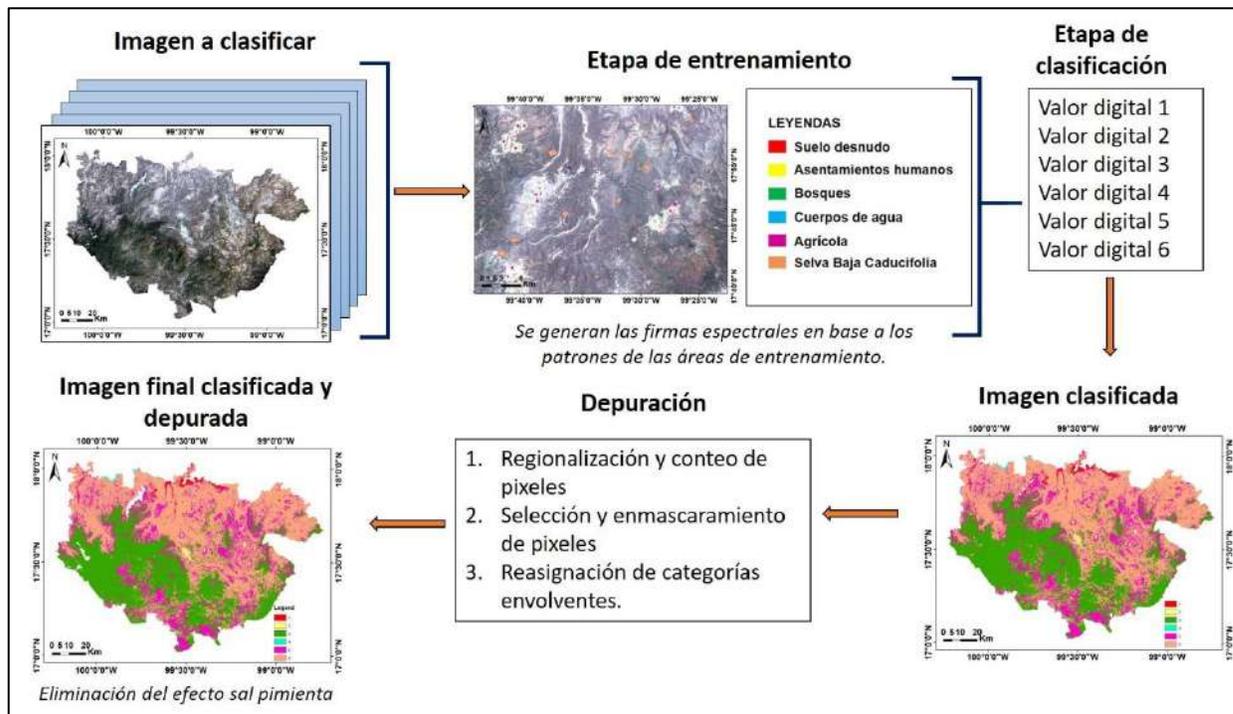


Figura No. 26 Esquema global del proceso de clasificación supervisada por el método de Máxima Verosimilitud para la generación de mapas de ocupación y uso de suelo.

En la figura anterior se muestra el proceso que conlleva la clasificación, en dado caso se inicia con las bandas que se pretenden usar para la clasificación, posteriormente la integración de la verdad terreno, en donde esta se divide en dos grupos como se mencionó con anterioridad, se aplica el proceso de clasificación, una vez obtenido el resultado se hace una depuración del mismo, eliminando el efecto conocido como sal pimienta y como resultado se obtiene un mapa final clasificado y depurado.

2.8. Evaluación de la precisión de la clasificación

Una vez obtenido los resultados de cualquier proceso de interpretación de imágenes, ya sea visual o digital, resulta obligado verificar la calidad de estos para comprobar la validez tanto del producto generado como del método propuesto. Este podría considerarse como el último paso de la clasificación digital (Chuvieco, 2010).

La verificación de los resultados permite al usuario valorar su grado de concordancia con la realidad, en ese sentido, esto siempre requiere que comparemos nuestros resultados con una fuente externa, que se considere fiel y represente la realidad presente en el terreno, en el momento de adquirir la imagen.

Dentro de las medidas de fiabilidad se podría decir que se subdividen en dos partes la cualitativa y la cuantitativa. La valoración cualitativa es la principal y se podrá determinar como si fuese más sencilla, porque es ahí donde el intérprete puede

determinar si los productos obtenidos son los esperados y ofrecen una visión sujeta a que los resultados son o no acordes con la realidad.

De otro modo, podría darse ahora la valoración cuantitativa, es aquí donde los resultados se someten a evaluaciones estadísticas, como cruzar la información resultante con muestras de categorías definidas como verdad terreno, es decir, el mapa resultante de ocupación y uso de suelo se somete a una evaluación de precisión basada en la comparación espacial entre la clase del mapa y la clase de validación (Olofsson et al. 2012) para conocer su nivel de exactitud, esto es por medio de la elaboración de una matriz de error o conocida como matriz de confusión. Esta matriz permite conocer el grado de concordancia entre las clases de vegetación obtenidas por el clasificador y los polígonos de entrenamiento (Helmer et al. 2002).

2.8.1. Matriz de confusión, error de comisión, error de omisión e Índice de concordancia Kappa

Para el caso de verificar una imagen clasificada, se tiene un listado de puntos de verificación, en este caso es la verdad terreno reservada de validación, y con esta lista se genera una tabla denominada matriz de confusión. En donde las columnas suelen indicar las clases de referencia y las filas las categorías deducidas de la clasificación, ambas tendrán el mismo número y significado, se trata de una suma, de una matriz cuadrada $n \times n$, donde n indica el número de categorías (Chuvieco, 2010).

La diagonal de la matriz expresa el número de puntos de verificación, en donde se produce acuerdo entre las fuentes (mapa y realidad), mientras que los marginales o los que se encuentran fuera de la diagonal representa los errores de asignación. La relación entre el número de puntos correctamente asignados y el total expresa la fiabilidad global del mapa (Tabla 14).

Tabla 14 Estructura de una matriz de confusión, tomada de Chuvieco, 2010.

Referencia							
	Clase 1	Clase 2	Clase 3	Clase n	Total	Exactitud usuario	Error comisión
Clase 1	X_{11}				X_{1+}	X_{11}/X_{1+}	$1-X_{11}/X_{1+}$
Clase 2		X_{22}			X_{2+}	X_{22}/X_{2+}	$1-X_{22}/X_{2+}$
Clase 3			X_{33}		X_{3+}	X_{33}/X_{3+}	$1-X_{33}/X_{3+}$
Clase n				X_{nn}	X_{n+}	X_{nn}/X_{n+}	$1-X_{nn}/X_{n+}$
Total	X_{+1}	X_{+2}	X_{+3}	X^{+n}	$\sum X_{ij}$		
Exactitud productor	X_{11}/X_{+1}	X_{22}/X_{+2}	X_{33}/X_{+3}	X_{nn}/X_{+n}			
Error omisión	$1-X_{11}/X_{+1}$	$1-X_{22}/X_{+2}$	$1-X_{33}/X_{+3}$	$1-X_{nn}/X_{+n}$			

En esa forma, no precisamente conocemos la fiabilidad global de la clasificación, sino que también se puede conocer los conflictos que se encuentra en ella. Los valores en ambos lados fuera de la diagonal representan dos tipos de errores, los cuáles son errores de omisión y errores de comisión. Los errores de omisión están representados

por los valores de las columnas y los errores de comisión representados por los valores de las filas (Chuvieco, 2010).

En el caso de los marginales que están en las columnas, se refiere a los errores de omisión (E_o) en donde indica que el píxel corresponde a una clase de vegetación y uso de suelo y no fue clasificado de esa manera, el complemento es la precisión del productor, este error se calcula como:

$$E_{o,i} = \frac{X_{+i} - X_{ii}}{X_{+i}} \quad (4)$$

Donde X_{+i} indica el marginal de la columna i , y X_{ii} la diagonal de dicha columna.

De forma similar, las celdas no diagonales de las filas expresan el error de comisión (E_c), esto quiere decir que los pixeles que se incluyeron a una categoría en realidad pertenecen a otra clase, y se calcula de esta manera:

$$E_{c,i} = \frac{X_{i+} - X_{ii}}{X_{i+}} \quad (5)$$

Donde X_{i+} indica el marginal de la fila i , y X_{ii} la diagonal de dicha fila.

Los errores de omisión y comisión expresan dos enfoques del mismo problema. Los primeros se refieren a no asignación a una categoría, mientras los segundos a una delimitación excesivamente amplia. Desde otro punto de vista, algunos autores hablan de exactitud del usuario y del productor, esto se obtiene con la inversa con los errores de comisión, mientras la segunda con los de omisión (Chuvieco, 2010).

$$F_{p,i} = \frac{X_{ii}}{X_{+i}} \quad (6)$$

$$F_{u,i} = \frac{X_{ii}}{X_{i+}} \quad (7)$$

Posteriormente, una vez construida la matriz de confusión obtenida del cruce de datos entre mapa clasificado versus información de validación (verdad terreno) y haber obtenido los errores de omisión y comisión, se deriva el coeficiente de concordancia Kappa, que nos indica el grado de confiabilidad del mapa (Chuvieco, 2010).

$$\hat{K} = \frac{n \sum_{i=1,n} X_{ii} - \sum_{i=i,n} X_{i+} X_{+i}}{n^2 - \sum_{i=i,n} X_{i+} X_{+i}} \quad (8)$$

Donde:

K = Índice de Coeficiente Kappa

n : tamaño de la muestra

X_{ii} : acuerdo observado

$X_{i+}X_{+i}$: acuerdo esperado en cada categoría

El índice de Kappa ayudó a conocer el grado de diferencia entre el acuerdo observado y el aleatorio esperado. El acuerdo observado sobresale en la matriz de confusión, mientras que el acuerdo esperado se utiliza para generar el ajuste entre el mapa y la realidad mediante la aleatoriedad (Chuvienco, 2010).

Hasta este punto, se han explicado con detalle suficiente cada uno de los procesos aplicados para la obtención de los mapas de ocupación y uso de suelo por el método supervisado de Máxima Verosimilitud. En el capítulo siguiente, se muestran, explican y discuten los resultados obtenidos.

CAPITULO 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Corrección topográfica

Como se describió en la metodología, la corrección topográfica forma parte del preprocesamiento de la información, se realizó aplicando el modelo de corrección conocido como SCS+C, debido a que es el más apropiado para las escenas montañosas (Soenen et al. 2005, Couturier et al. 2013, Fan et al. 2014); para lo cual se calcularon los parámetros C de cada una de las bandas para cada una de las fechas a través de una clasificación de pendientes del terreno de la zona de estudio (Vázquez-Jiménez, et al. 2017).

Esta corrección se realizó por medio de un modelo que se generó en Dinámica EGO, en donde se adjunta la información que es parte del método de corrección topográfica SCS+C en donde los insumos de entrada son: mapa de pendientes, mapa de orientación del terreno, azimut solar, ángulo cenital, y las bandas con valores de reflectancia de las fechas correspondientes, así mismo la máscara de nubes de la escena.

El resultado es la eliminación de las sombras sobre la imagen original que son ocasionadas por el relieve topográfico y la geometría del sol al momento de la toma de la escena, y posteriormente una vez aplicado el modelo de corrección topográfica puede observarse la mejora de esta (fig. 27).

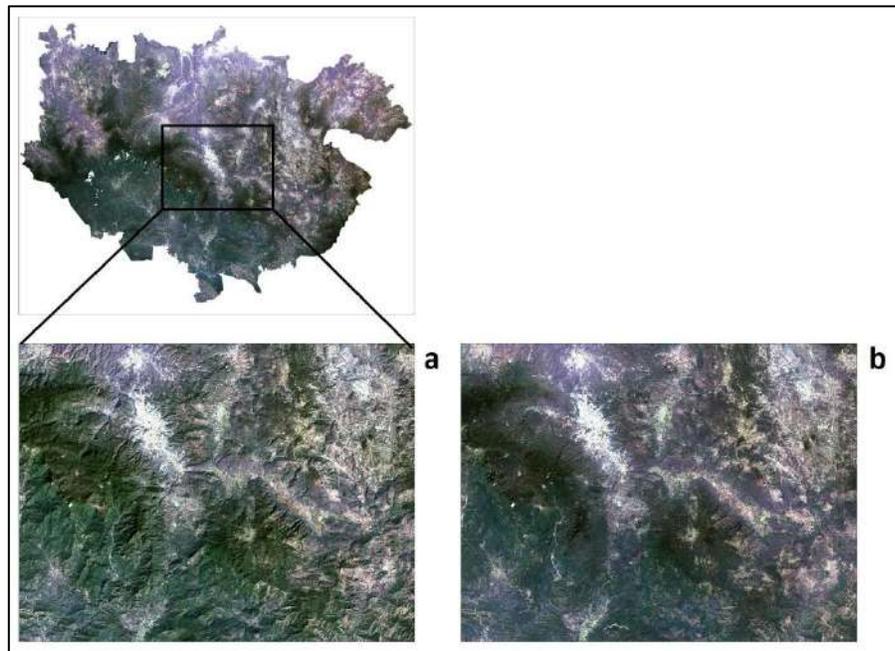


Figura No. 27 Resultado de la corrección topográfica por el método SCS+C de la fecha Ene29-2019, a) Composición a color RGB antes de la corrección topográfica, b) Composición a color RGB después de aplicar la corrección topográfica.

Puede observarse en las imágenes que se muestra una mejora visual con respecto a las pendientes y las sombras que se ocasionan en la imagen corregida por clasificación de pendientes (fig.27b) con respecto a la otra imagen que no está corregida topográficamente (fig.27a.)

3.2. Transformación de las imágenes

Una vez que ya se tienen las fechas de la zona de estudio corregidas topográficamente, es preciso recurrir a la transformación de dichas para poder diferenciar y evaluar los distintos tipos de información que se pueden obtener, para lo cual se obtuvieron dos transformaciones que son comunes para estudios de percepción remota, y así mismo que han dado buenos resultados para la elaboración de cartografía de ocupación y uso de suelos.

3.2.1. Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada

Los índices de vegetación sirven para identificar el estado de salud de la vegetación, es decir, los valores van desde el -1 al +1 en relación directa con la cobertura de la vegetación en cada pixel de la imagen, para lo cual se obtuvieron los siguientes índices de vegetación para las fechas Mar-03-2000 (fig.28a), Feb-24-2011 (fig.28b) y Ene-29-2019 (fig.28c), en donde analizando visualmente las zonas de color rojo se indica suelo desnudo, erosionado e incluso de vegetación pobre, caso contrario, lo que se observa de color verde se muestra que es vegetación sana o densa. La vegetación que se muestra en color amarillo puede asociarse a vegetación poco arbustiva, suelo semi seco o subseco, que son propios característicos de la selva baja caducifolia, en donde se analiza visualmente en los mapas de vegetación que las categorías de bosque con selva baja caducifolia pueden observarse la diferencia de entre uno y otro.

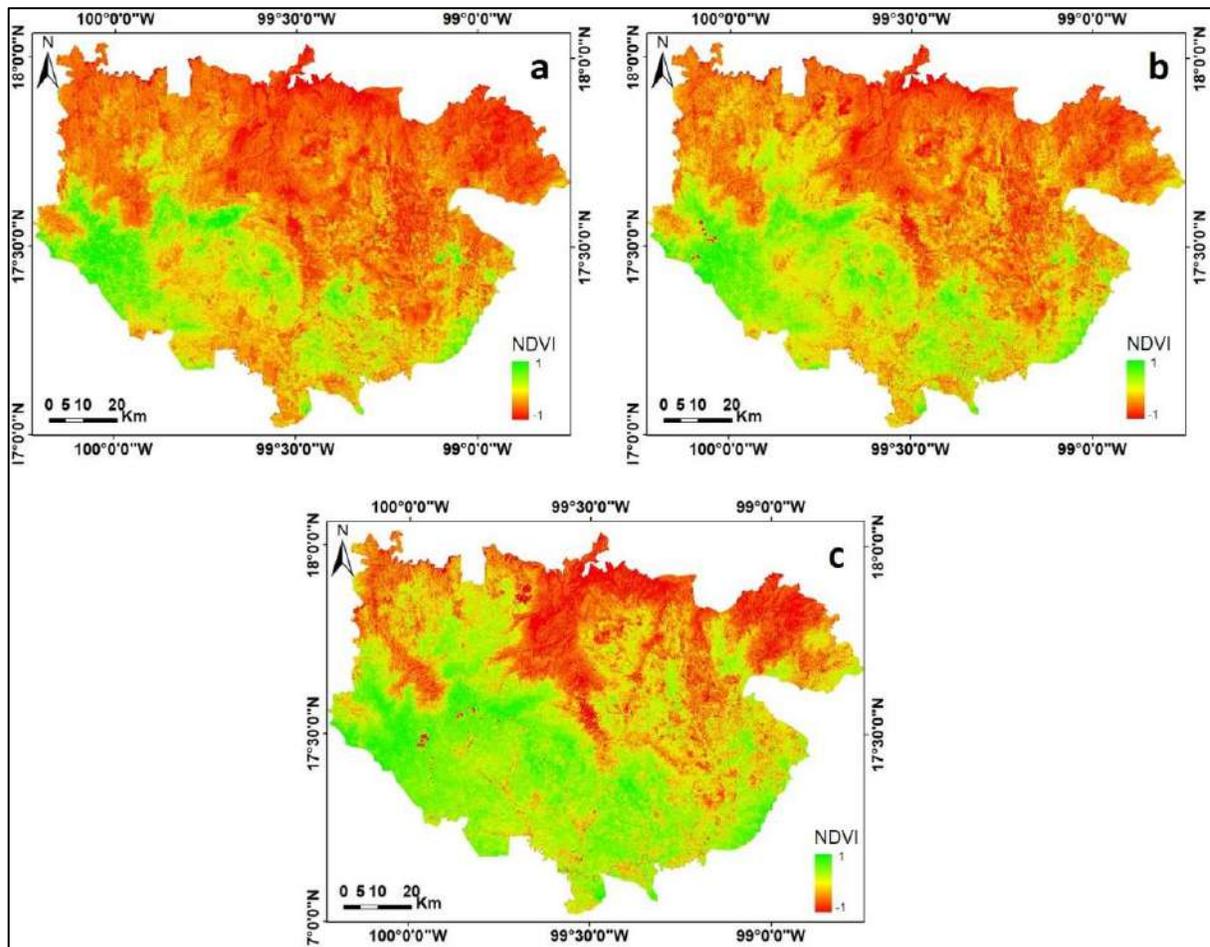


Figura No. 28 Índices NDVI de fechas: a) Mar-03-2000, b) Feb-24-2011 y c) Ene-29-2019.

Analizando un poco las diferencias de estas imágenes transformadas puede observarse que una con respecto a otra muestra diferencias y aunque visiblemente puede verse que hay menor vegetación en el 2000 (fig. 28a) con respecto al 2019 (fig. 28c). Existen una diferencia aproximada de diez años entre las imágenes, siendo posible que se reflejen cambios irreversibles en ese tiempo, como la explotación minera. Además, existen diferencias de meses entre las escenas, por lo que el incremento de vegetación sana en enero puede ser debido a una mayor humedad en el ambiente de la zona de estudio que favorece la vegetación de la selva baja caducifolia, mientras que en marzo en ambiente es seco y la vegetación perenne de la selva baja empieza a secarse. Las zonas en color verde más intenso representan el bosque no caducifolio y se puede observar que se define bien su contorno, y dado a que la vegetación de esas zonas es más densa entonces tiende a tener una similitud visual en las tres escenas.

3.2.2. Análisis de los componentes principales

El análisis de CP genera nuevas variables mediante una combinación lineal de las n bandas originales. A pesar de que finalmente se requieren los n componentes principales para reproducir la variabilidad total, la mayor parte de esta variabilidad está

contenida en un número menos de componentes m . De esto modo, reemplazando las n bandas por los m componentes, reduciendo así la dimensionalidad, pero conservando casi la totalidad de los datos originales de información (Ferrero et al. 2000).

Se utilizaron los primeros tres CP para cada una de las fechas (Mar-03-2000, Feb-24-2011 y Ene-29-2019) de las imágenes con valores de reflectancia normalizado, que se usaron para la aplicación del proceso de clasificación (fig. 29).

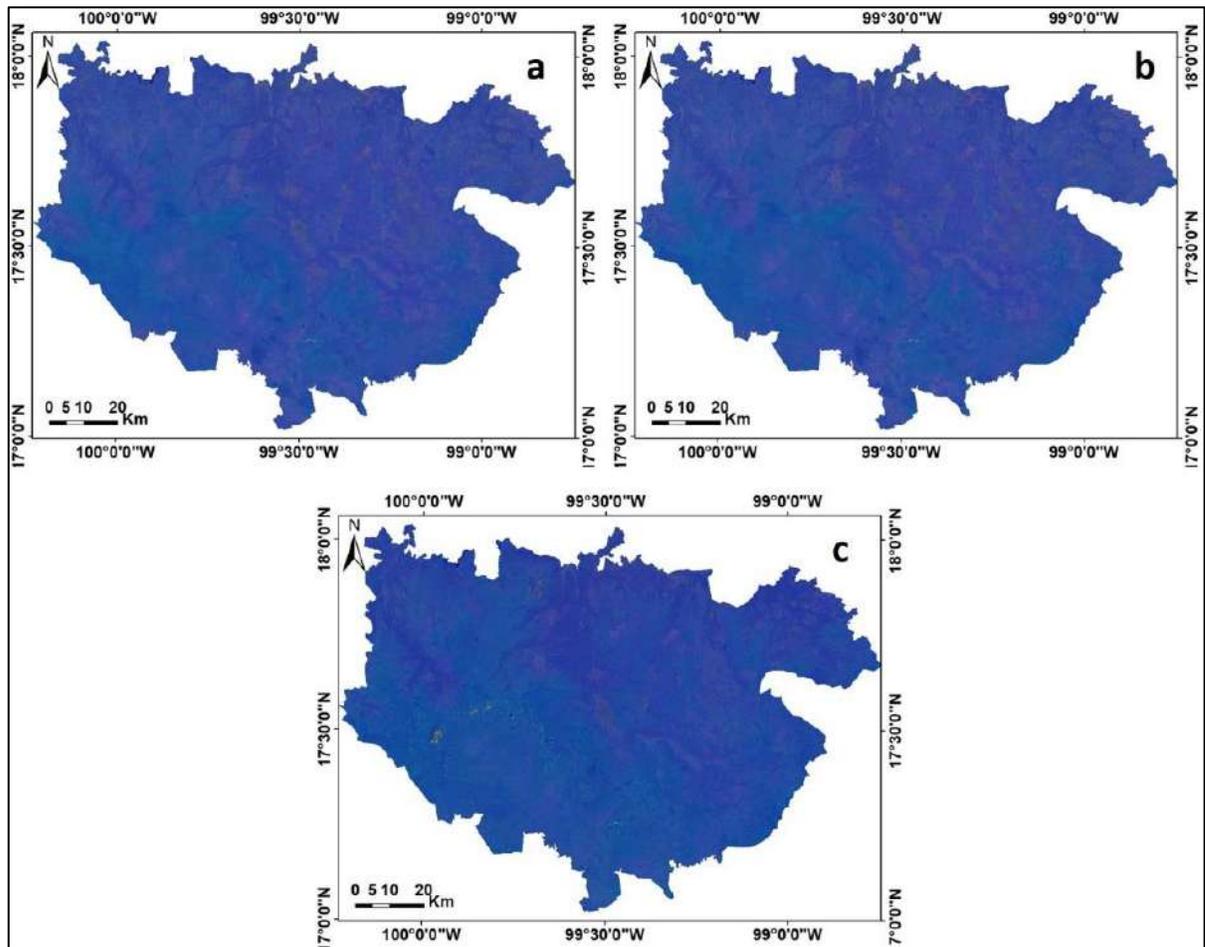


Figura No. 29 Imagen multibanda de los 3CP de fechas: a) Mar-03-2000, b) Feb-24-2011 y c) Ene-29-2019

3.3. Generación de cartografía de ocupación y uso de suelo.

3.3.1. Clasificación y depuración de los mapas de ocupación y uso de suelo.

La figura 30 muestra composiciones en color de la fecha Ene-29-2019 y los resultados de los procesos de clasificación supervisada y depuración aplicados.

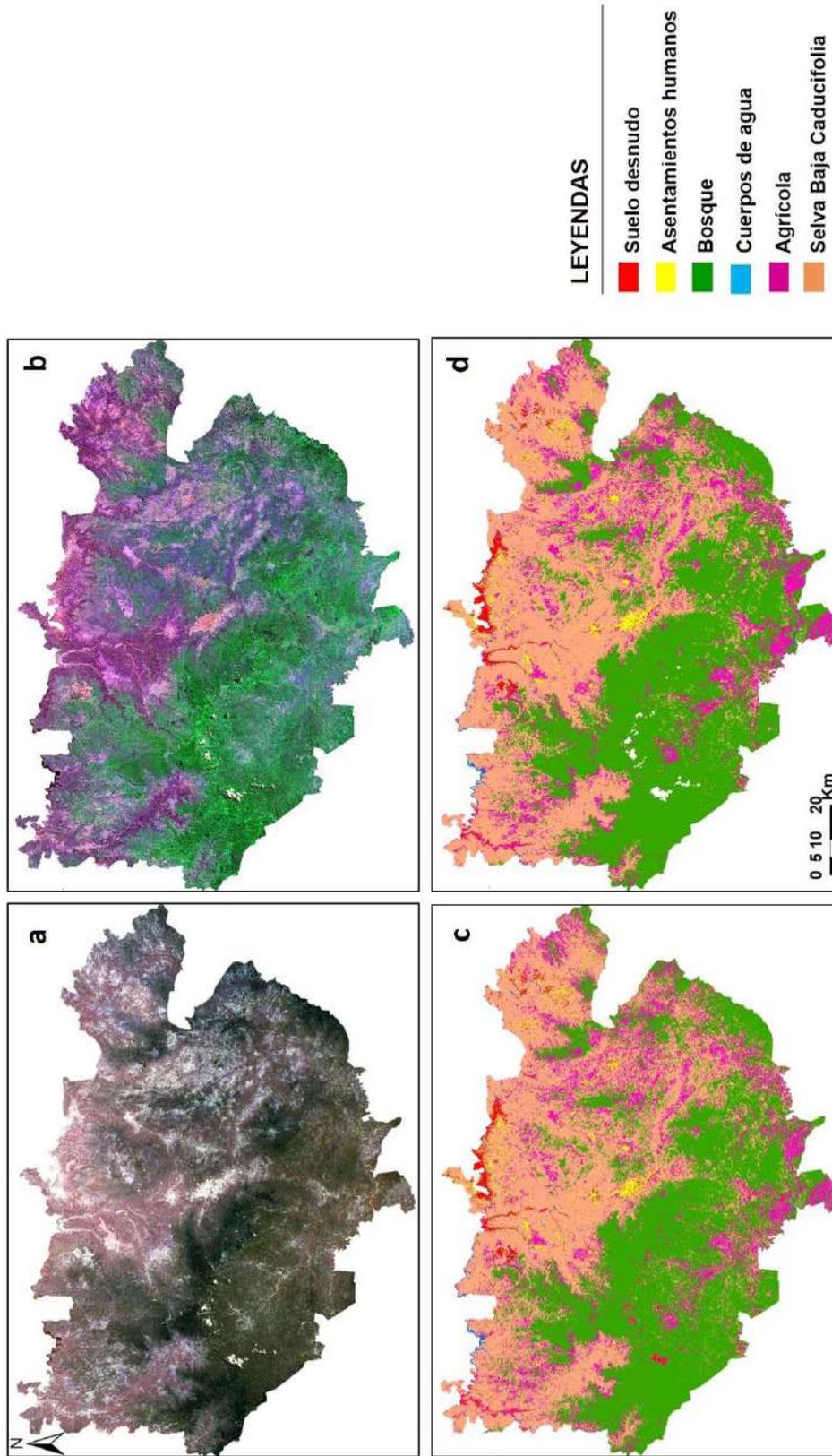


Figura No. 30 Composición de bandas para la fecha Ene-29-2019. a) En color verdadero, bandas 432, b) En falso color bandas 654; y resultado del proceso de clasificación c) Mapa clasificado sin depurar y d) Mapa clasificado y depurado.

De acuerdo con la fig. 30, se muestran composiciones en color en las que se pueden apreciar las cubiertas de ocupación y uso de suelo de la zona de estudio, y asimismo pueden apreciarse el resultado del proceso de clasificación por máxima verosimilitud aplicado a las capas de MDE, NDVI y los 3 primeros CP y la mejora de esto se logra aplicando el proceso de depuración de pixeles aislados.

En la clasificación, se logra visualizar como algunos pixeles se clasifican de manera aislada de acuerdo con los polígonos de entrenamiento que se usaron en este caso para esta fecha, (efecto que se le conoce como *sal pimienta*), algunos pixeles en color amarillo representan a los asentamientos humanos en donde se asignó la categoría de zona agrícola, esto puede deberse a la similitud que presentan ambas categorías. Para corregir este efecto, se aplicó a la imagen resultante de la clasificación un proceso de depuración, el cual consiste en corregir los pequeños grupos de pixeles aislados y agruparlos a las categorías que podrían pertenecer, dando una mejora visual al mapa final, como puede observarse en la figura siguiente.

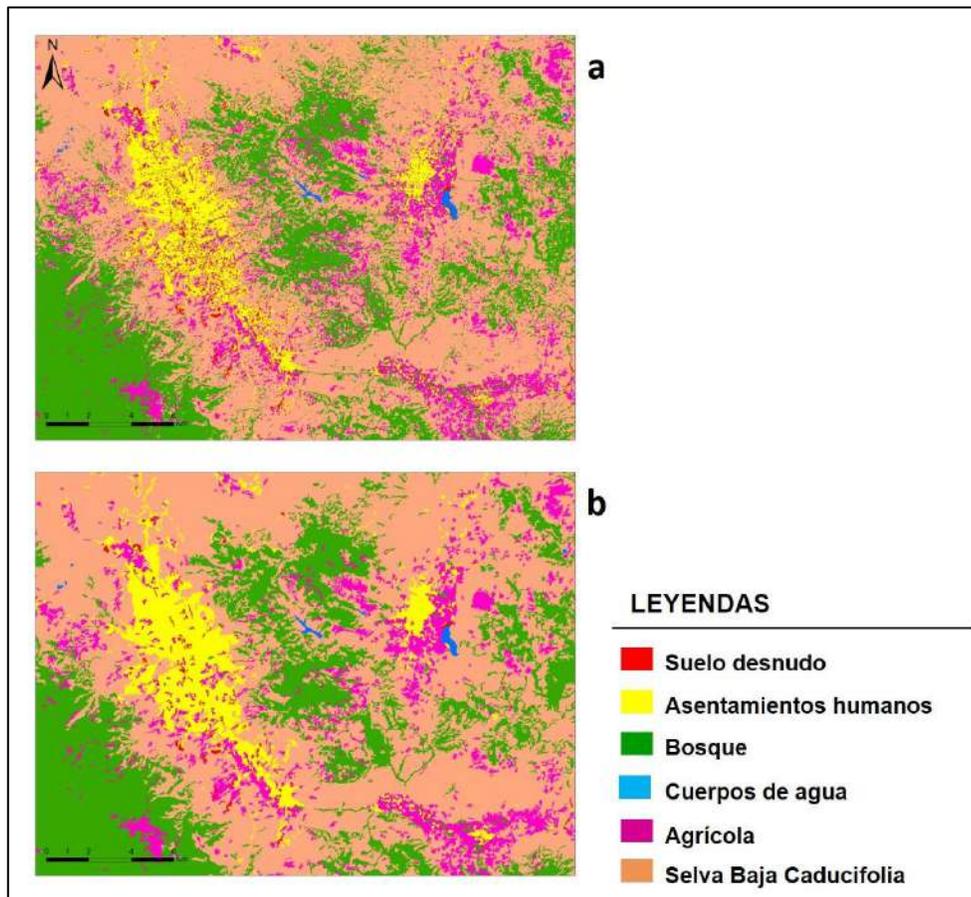


Figura No. 31 Acercamiento sobre una zona urbana con colindancia a poblaciones que se dedican a la agricultura, a) Resultado del proceso de clasificación y b) Resultado del proceso de depuración. Mapa resultado de ocupación y uso de suelo de la fecha Ene-29-2019.

Como puede observarse, la eliminación del efecto sal pimienta es notoria a simple vista y con esto se puede decir que mejora visualmente el mapa de ocupación y uso de suelo de la fecha base Ene-29-2019. Es así como la imagen resultante del proceso de clasificación supervisada y depuración de los píxeles aislados (fig. 30d), nos representa la cartografía de ocupación y uso de suelo que será la base para el proceso de generación de cartografía de ocupación y uso de suelo para el resto de las fechas de estudio.

En una exploración visual del mapa resultado de ocupación y uso de suelo de la fecha Ene-29-2019 (fig. 30d), puede observarse como la categoría de selva baja caducifolia predomina y cubre desde la parte central hasta el norte, por otro lado, se observa como la cubierta de bosque se encuentra sobre el suroeste. Al centro del mapa, se observa de color amarillo a la ciudad de Chilpancingo, capital del estado.

3.3.2. Comparación de la cartografía de ocupación y uso de suelo generada (Año 2011) con respecto a la Serie V de Vegetación y Uso de Suelo.

Se realizó una comparativa cualitativa y cuantitativa con respecto a la Serie V de Vegetación y Uso de Suelo con el resultado de la clasificación supervisada por el método Máxima Verosimilitud (fig. 32) en donde pueden observarse coincidencias en las formas y dimensiones de las categorías de ocupación, primordialmente en las zonas que cubren una mayor extensión; sin embargo, puede notarse algunas diferencias: al noroeste en la serie V de uso de suelo y vegetación se observan porciones de bosque, mientras que en la clasificación esas categorías fueron categorizadas como zona agrícola.

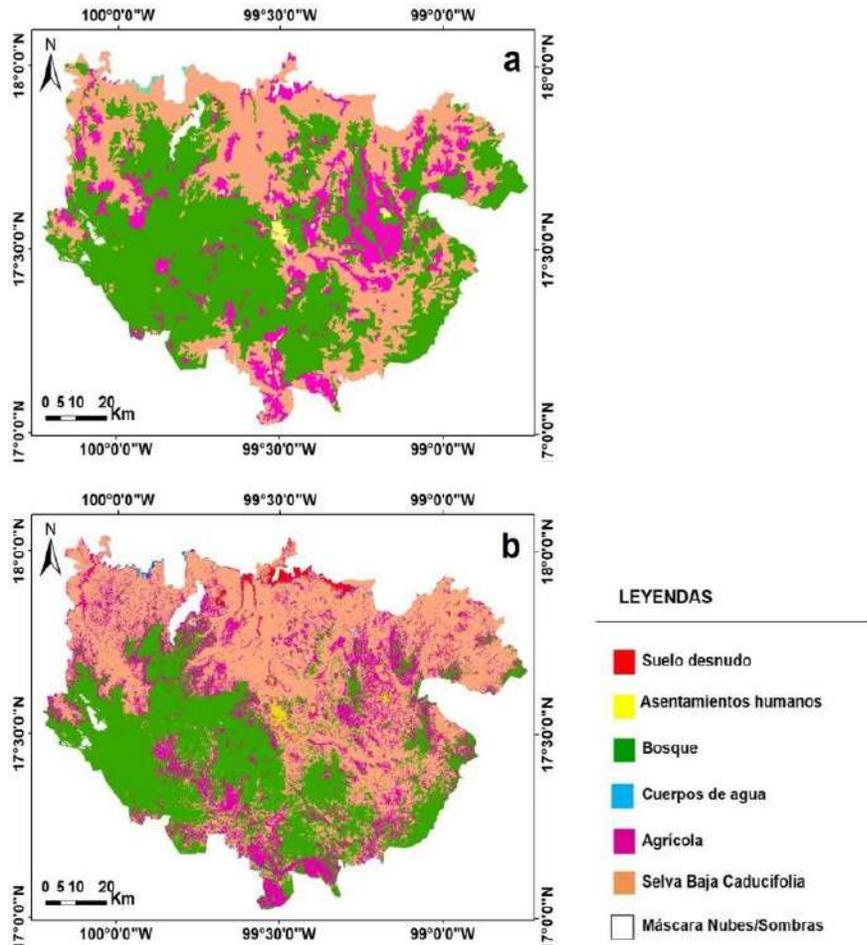


Figura No. 32 a) Mapa de reclasificación de las cubiertas de la serie V de uso de suelo y vegetación del INEGI, y b) Mapa resultado de clasificación supervisada por el método Máxima Verosimilitud fecha Feb24-2011.

Analizando estas diferencias visuales de la Serie V de uso de suelo y vegetación con respecto al mapa resultado de la clasificación supervisada, donde ambos mapas son correspondientes al año 2011, se entiende que esto es por las transferencias de ocupación que se han dado a través del tiempo, sin embargo también es posible encontrar criterios distintos aplicados por el INEGI en la determinación de las categorías de su propio mapa de ocupación.

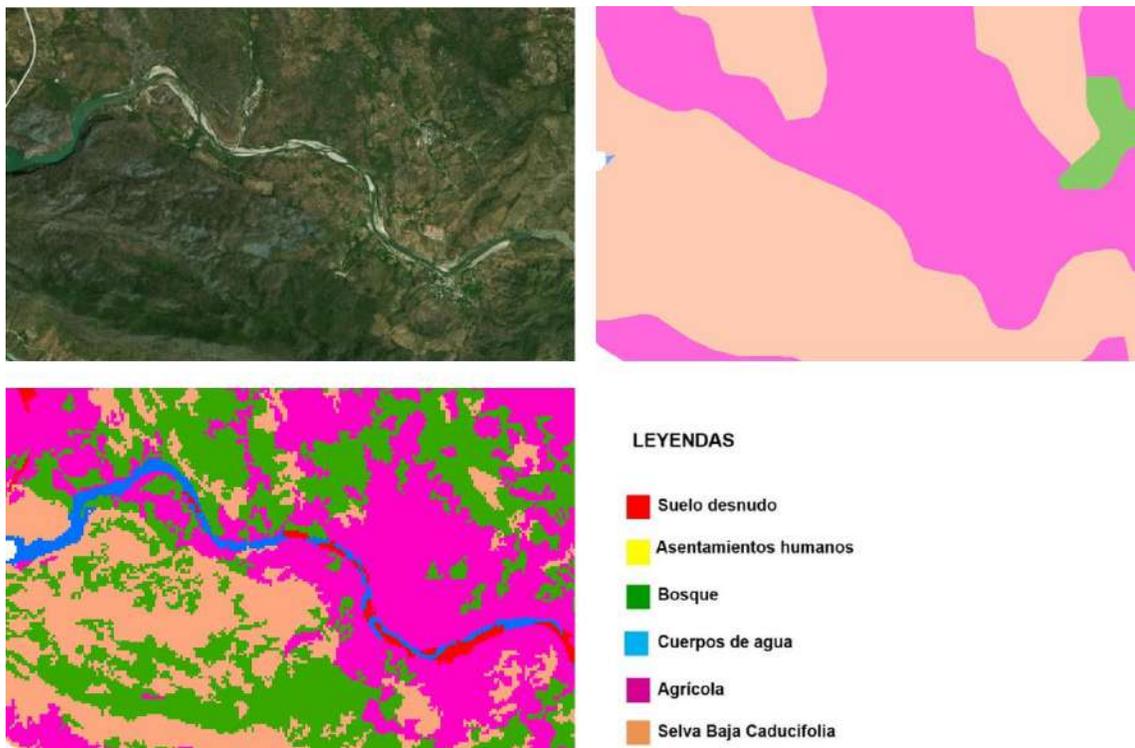


Figura No. 33 Acercamiento de la zona de estudio. Fotografía aérea (superior izquierda), cartografía oficial de ocupación del suelo serie V (superior derecha), resultado de clasificación y depuración de fecha Feb24-2019 (inferior izquierda), donde se muestran posibles imprecisiones.

Analizando un poco esta situación, en la figura anterior, se muestra algunas posibles imprecisiones que puede tener la cartografía oficial. Es evidente como la serie V generaliza la cartografía y elimina elementos importantes como es el caso del río que INEGI lo considera como zona agrícola o selva baja caducifolia; mientras que en el mapa resultado de la clasificación y depuración si es considerado como cuerpo de agua (Río de Omitlán).

Es muy probable que estas imprecisiones se deban a la representación espacial y eficiencia del mapa impreso de acuerdo con la escala del producto, en donde interviene aquí el Área Mínima Cartografiable que indica que ciertos polígonos y sus contenidos son generalizados a partir del valor de la superficie para evitar confundir al usuario al tratar de interpretar en el valor analógico.

A continuación, en la tabla 15 muestra los porcentajes de superficie ocupada por cada categoría en cada uno de los mapas comparados, así como la diferencia relativa entre ellas.

Tabla 15 Porcentaje de superficie por categoría de ocupación y uso de suelo de los mapas comparados.

CATEGORIA	MAPAS		
	SUPERFICIE CLASIFICADA	SUPERFICIE SERIE V DEL INEGI	DIFERENCIA
1. Suelo desnudo	0.78%	0.02%	0.76%
2. Asentamientos humanos	0.87%	0.52%	0.35%
3. Bosque	34.34%	49.86%	-15.53%
4. Cuerpos de agua	0.34%	0.15%	0.19%
5. Agrícola	18.48%	13.29%	5.20%
6. Selva Baja Caducifolia	45.19%	36.15%	9.03%

Puede apreciarse que las categorías de uso que presentan mayor variación son la de bosque, selva baja caducifolia y agrícola; con variaciones de -15.53%, 9.03% y 5.20% respectivamente. Por otro lado, las clases que menor variación presentan son los asentamientos humanos y cuerpos de agua con el 0.35% y 0.19% respectivamente.

La Tabla 16 muestra la matriz de tabulación cruzada entre mapas de ocupación y uso del suelo comparados.

Tabla 16 Matriz de tabulación cruzada entre los mapas de ocupación comparados (ha).

Clasificación	Serie V de uso de suelo y vegetación						Total (Clasif.)	Diferencias
	Suelo desnudo	Asentamientos humanos	Bosque	Agua	Agrícola	Selva Baja Caducifolia		
Suelo desnudo	98.46	82.98	658.26	27.18	4,837.41	2,531.16	8,235.45	8,136.99
Asentamientos humanos	3.96	3,806.91	385.56	4.05	3,678.03	1,373.67	9,252.18	5,445.27
Bosque	0	17.37	319,393.17	0.18	9,540.81	35,213.67	364,165.20	44,772.03
Agua	9.09	1.35	91.80	1,441.89	550.80	1,551.6	3,646.53	2,204.64
Agrícola	28.98	1,351.08	74,670.93	78.48	62,954.91	56,961.45	196,045.83	133,090.92
Selva Baja Caducifolia	31.23	307.62	133,635.60	82.89	59,383.98	285,796.80	479,238.12	193,441.32
Total (Serie V)	171.72	5567.31	528,835.32	1,634.67	140,945.94	383,428.35	1,060,583.31	
Diferencias	73.26	1760.40	209,442.15	192.78	77,991.03	97,631.55		

En la diagonal principal de la matriz se observan las superficies que coinciden para cada categoría en ambos mapas. Puede observarse una coincidencia del 63.50% y con ello un margen de diferencia del 36.50% entre los mapas. Estas diferencias pueden deberse a errores de omisión y/o confusión propios del algoritmo clasificador. Los errores por esta causa pueden deberse a la aplicación de distintos criterios al analizar y determinar las categorías de ocupación durante la integración de la información y el proceso de clasificación desarrollado por el INEGI en la cartografía oficial.

Para la categoría de bosque que es la que presenta las mayores diferencias, se puede observar en la matriz de confusión que el mapa clasificado reporta una superficie de 164,670.12 hectáreas menos que el mapa oficial (Tabla 15). En este sentido se observa que el mapa oficial considera como bosque 133,635.6 has que el mapa

clasificado considera como selva baja; además de que 74,670.93 has que el mapa oficial considera como bosque, se consideran como zonas agrícolas en la clasificación.

En el caso de la clase de selva baja, hay una diferencia de 95,809.77 ha, a favor del mapa clasificado. De acuerdo con la matriz de confusión, se observa que 35,213.67 ha el mapa oficial los considera como selva baja, mientras que el mapa clasificado los considera como bosque y 56,961.45 ha que el mapa oficial considera como selva baja, mientras que el mapa clasificado los considera como agrícola.

Para el caso de las zonas agrícolas, se observa una diferencia de 55,099.89 ha, a favor del mapa clasificado. Según la matriz de confusión, se observa que 59,383.98 ha que el mapa oficial considera como agrícola, el mapa clasificado los considera como selva baja caducifolia y 9,540.81 ha que el mapa oficial considera como agrícola, el mapa clasificado los como bosque.

3.3.3. Evaluación de la precisión de la cartografía de ocupación y uso de suelo.

Para evaluar la calidad de los resultados que ofrecen los estudios de Percepción Remota, es recomendable realizar una evaluación cualitativa y cuantitativa de lo derivado; es recomendable hacer una visualización de los mapas resultado, como se muestra en la figura 30, correspondiente a la fecha Ene-29-2019 en donde en fig. 30a y 30b se muestran composiciones a color, y la fig. 30c y 30d muestra el resultado clasificado sin depurar y depurado.

Analizando visualmente la imagen, la categoría de asentamientos humanos que está categorizada en color amarillo, si hace referencia a la categoría, y visualmente se nota la capital del Estado, que está al centro de la zona de estudio, así mismo, se notan las localidades que están dispersas por mencionar algunas como Xochipala, Chichihualco, Tixtla, Chilapa. Así mismo, la categoría agrícola que es identificada de color fiusha está muy dispersa y sobre todo es muy común encontrar esta categoría cerca de las localidades, por las actividades que se realiza sobre ellas.

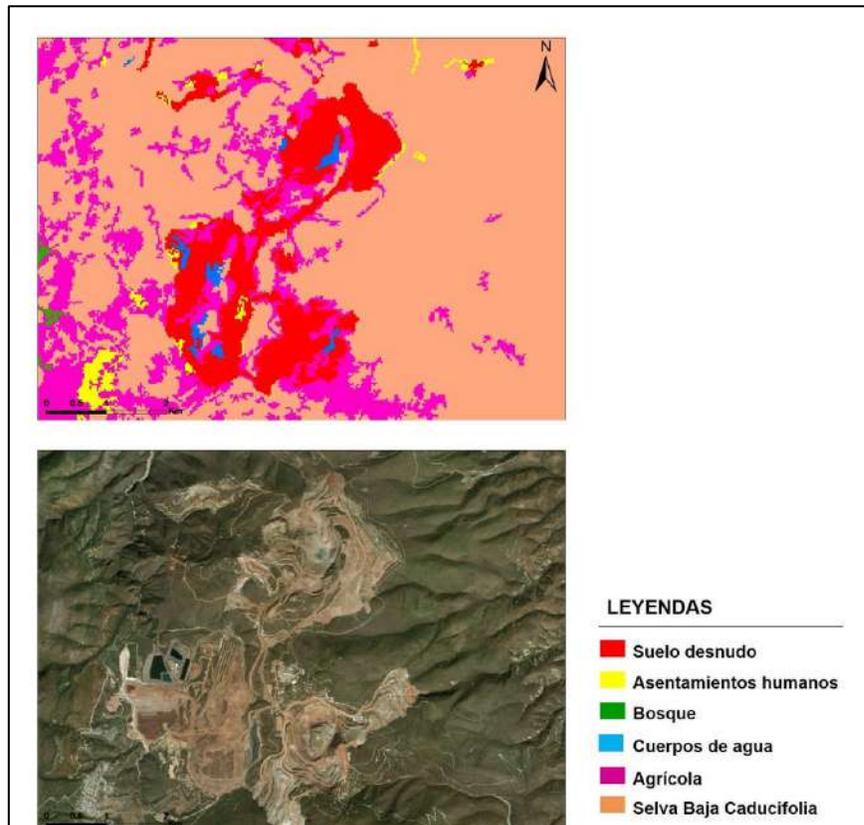


Figura No. 34 Acercamiento de la zona de estudio en la parte norte (zona minera); Resultado del proceso de clasificación (arriba) y fotografía aérea (abajo). Mapa resultado de ocupación y uso de suelo correspondiente a la fecha Feb-24-2011.

Como se puede apreciar en la ilustración (fig. 34) el acercamiento de la zona de estudio corresponde a la zona minera. En particular se observa suelo desnudo (color rojo) que corresponde a la explotación de mineral de la zona, así mismo puede observarse en la parte inferior izquierda una mancha de color amarillo que está identificada como asentamientos humanos, a la cual realmente corresponde, tratándose del poblado de Carrizalillo, así mismo que parte de la zona minera pueden observarse mismos polígonos en color amarillo siendo estos propios de la infraestructura por la cual está conformada, es decir se clasificaron de ese modo.

En otro punto, también es notorio observarse cuerpos de agua dentro de la misma zona minera, que son identificados en la fotografía aérea como tanques de almacenamiento que son utilizados para la extracción de mineral por lixiviación con Cianuro, los cuales si se identificaron de manera correcta dentro del proceso de clasificación.

En el área por donde se ubica la zona minera, la vegetación predominante es la selva baja caducifolia, la cual si es identificada (color marrón claro) y es correspondiente al mapa resultado de ocupación y uso de suelo de fecha Feb24-2011, esto de acuerdo

con la fig. 34, es decir, en este caso la respuesta espectral de la dicha zona si concuerda con la verdad terreno muestreada de acuerdo con el análisis visual.

Después de haber realizado una exploración visual de, la imagen que se obtuvo de los procesos de clasificación, depuración e integración final de la cartografía de ocupación y uso de suelo para la fecha Ene-29-2019, se procede a realizar una exploración o validación cuantitativa, y para llevar a cabo eso, se analiza la siguiente matriz de confusión.

La Tabla 17 muestra la matriz de confusión de la fecha Ene-29-2019, donde se comparan la información de las categorías de ocupación y uso de suelo obtenidas por el proceso de clasificación, representado por las filas; con la información de la verdad terreno reservada para validación (un tercio de la muestra) que son representadas por las columnas.

Tabla 17 Matriz de confusión del mapa final de ocupación y uso del suelo comparado con la verdad terreno destinada para validación. Fecha Ene-29-2019.

	Suelo desnudo	Asent. Humanos	Bosques	Cuerpos de Agua	Agrícola	SBC	TOTAL	Aciertos Usuario	Errores comisión
Suelo desnudo	824	82	0	0	186	10	1102	74.8	25.2
Asentamientos humanos	10	1053	0	0	236	135	1434	73.4	26.6
Bosques	0	0	10682	0	82	467	11231	95.1	4.9
Cuerpos de Agua	0	0	0	462	0	14	476	97.1	2.9
Agrícola	16	66	39	28	2416	1026	3591	67.3	32.7
Selva Baja Caducifolia	0	0	51	8	1033	8028	9120	88.0	12.0
Total	850	1201	10772	498	3953	9680	26954		
<i>Aciertos Productor</i>	96.9	87.7	99.2	92.8	61.1	82.9			
<i>Errores Omisión</i>	3.1	12.3	0.8	7.2	38.9	17.1		Índice Kappa	81.20

Puede observarse que la mayor parte de los pixeles que fueron reservados para la validación se concentran en la diagonal principal de la matriz de confusión, con lo cual puede anticiparse que los resultados son buenos para cada una de las categorías de ocupación y uso de suelo. Aunque puede observarse que fuera de la diagonal, existen ciertas irregularidades que merecen ser analizadas y discutidas.

Es conveniente explorar la fila que presenta mayor confusión que es la categoría identificada como Agrícola, en la cual se observa que se clasificó en un 4.7% como suelo desnudo, 6% como asentamientos humanos, 2.1% como bosque y un 26.1% como selva baja caducifolia, este último es el que presenta mayor confusión con respecto de las demás categorías. Este tipo de confusión dentro de la categoría de agrícola y que ha sido asignado a otra, (selva baja caducifolia) es porque ambas categorías presentan características similares de acuerdo con la respuesta espectral de la vegetación, así como a las características del terreno. Esta misma situación se presenta con otros tipos

de confusiones por ejemplo entre el suelo desnudo y los asentamientos humanos ya que las localidades con sus zonas de pavimento o concreto, presentan una respuesta espectral similar al suelo desprovisto de vegetación con cierto tipo de material de suelo o roca.

Continuando con el análisis de la matriz, la segunda categoría de la que presenta confusión es la que se identificó como selva baja caducifolia, en donde en el mapa ha sido clasificado un 10.6% como agrícola, el 4.8% como bosque, el 1.4% como asentamientos humanos y del 0.2% como agua y suelo desnudo.

Para la categoría de asentamientos humanos, se observa que el 87.7% de sus píxeles han coincidido en el cruce del mapa clasificado con la verdad terreno, pero ha de observarse que esta categoría presenta dos confusiones que sobresalen, el 6.8% se asignó a suelo desnudo y un 5.5% se asignó a las zonas agrícolas. Estas probables confusiones, como ya se mencionó, puede explicarse porque estas superficies emiten un valor de energía similar, así mismo, el mineral del suelo podría ser similar a la infraestructura de una zona urbana.

Para el caso de los cuerpos de agua, se registra una confusión del 5.6% que fue asignada como agrícola y un 1.6% que fue clasificado como selva baja caducifolia. En realidad, son valores bajos aceptables, pero existen algunos casos de zonas agrícolas de riego colindantes con cuerpos de agua, existiendo algunas zonas intersticiales que pueden ser los casos de confusión.

En el caso de la categoría de suelo desnudo se encuentra una coincidencia del 96.9%, y por tanto la confusión es mínima del 1.2% para asentamientos humanos y del 1.9% que fueron asignados como zonas agrícolas.

La última categoría por analizar es la de bosque con un 99.2% de coincidencia, en donde las confusiones que presenta para las leyendas de agrícola con un 0.4% y un 0.5% para selva baja caducifolia, siendo estos valores aceptables.

Se puede decir que la zona de estudio abarca dos grandes categorías las cuales son Bosque y Selva Baja Caducifolia, ambas con características diferentes con respecto a vegetación, elevación, pendiente del terreno, por mencionar algunas; en ese sentido, al integrar los polígonos de verdad terreno, obviamente resulta en cierto punto un poco difícil, para separar categóricamente las áreas, pues es bien cierto, que ciertos tipos de cubiertas distintas presentan estructuras, propiedades o características similares con lo cual reaccionan también en forma similar ante la energía (Vázquez-Jiménez, 2017).

Es así, que como se observó la matriz de confusión a manera de ejemplo las categorías de selva baja caducifolia con cultivos de las zonas agrícolas. También se

puede observar que algunas zonas se identificaron como zonas agrícolas, pero estas se han clasificado como suelo desnudo e incluso se confunden con los propios asentamientos humanos y esto puede deberse a que las mismas zonas agrícolas algunas están en uso, pero otras en descanso (barbechos), siendo así que presenten un valor espectral similar con suelo o localidades.

De esta forma, las confusiones analizadas para la fecha Ene-29-2019, de algún modo se justifican el comportamiento de los resultados obtenidos, ya sea por similitud, valores espectrales, características, etc. Es preciso hacer notar que los errores de omisión son en general bajos, pues en promedio arrojan un 13.2% para todas las categorías analizadas, presentando el valor más alto en 38.9% correspondiente a la categoría de zonas agrícolas, (Tabla 17). Los errores de comisión arrojan un promedio general del 17.3% y también el valor más alto se da en la misma categoría agrícola.

El tener valores bajos de omisión y comisión, significa saber los aciertos de usuario y de productor, así como notar el promedio de acierto que se tiene es de un 85% promedio general, sin embargo, por otro lado, la categoría agrícola ronda el 64% de acierto, por la confusión que se ha explicado previamente, (Tabla 16).

De acuerdo con los valores que se obtuvieron de la matriz de confusión, la evaluación de la precisión de la asignación final de las categorías de ocupación y uso de suelo para la fecha Ene-29-2019, se considera satisfactoria, alcanzando un índice de concordancia Kappa del 81.20%.

De la misma forma, para las otras fechas del estudio, se realizó la cartografía de ocupación y uso de suelo y se procedió a la evaluación de la precisión cartográfica, generando también las matrices de confusión para estas fechas (Tabla 18 y Tabla 19).

Tabla 18 Matriz de confusión del mapa final de ocupación y uso del suelo comparado con la verdad terreno destinada para validación. Fecha Feb-24-2011.

	Suelo desnudo	Asent. Humanos	Bosques	Cuerpos de Agua	Agrícola	Selva Baja Caducifolia	TOTAL	Aciertos Usuario	Errores comisión
Suelo desnudo	464	0	0	0	122	0	586	79.2	20.8
Asentamientos humanos	0	1013	0	12	61	2	1088	93.1	6.9
Bosques	0	0	11129	1	30	132	11292	98.6	1.4
Cuerpos de Agua	0	0	0	427	0	3	430	99.3	0.7
Agrícola	11	37	48	7	2367	903	3373	70.2	29.8
Selva Baja Caducifolia	0	0	52	2	796	7840	8690	90.2	9.8
Total	475	1050	11229	449	3376	8880	25459		
Aciertos Productor	97.7	96.5	99.1	95.1	70.1	88.3			
Errores Omisión	2.3	3.5	0.9	4.9	29.9	11.7		Índice Kappa	86.90

Como puede observarse en la diagonal de la matriz de confusión, la mayoría de los pixeles coinciden; pero la categoría que presenta mayor confusión es la zona agrícola

que fue identificada así y la clasifica como selva baja caducifolia y suelo desnudo, así mismo clasifica a 30 pixeles como bosque y 61 pixeles como asentamientos humanos.

Analizando la categoría de selva baja caducifolia, se puede ver que en el mapa clasificó a 903 pixeles como agrícola y 132 para bosque, siendo estas dos categorías que presentan mayor confusión, caso contrario a las categorías de suelo desnudo, asentamientos humanos y cuerpos de agua, la confusión es mínima, en ese caso se puede decir que en el mapa se han clasificado bien.

El promedio general de los errores de omisión nos da un 8.9%, lo cual es excelente, y de los errores de comisión un promedio del 11.6%, indicando que el punto de confusión como ya se mencionó para la categoría identificada como agrícola del 29% tanto en omisión como comisión, y obteniendo un índice de concordancia kappa del 86.90%, lo cual nos indica que es un resultado aceptable.

Para el caso de la fecha Marzo-21-2000 (Tabla 19), puede observarse que el índice Kappa nos da un 76.59%, cabe hacer mención que antes de esto, igual la mayoría de los pixeles se concentran en la diagonal principal, y los que se encuentran fuera son las confusiones que pretenden ser analizadas, como es la categoría identificada como agrícola la cual se clasifican 523 pixeles como asentamientos humanos y 1199 como selva baja caducifolia.

Tabla 19 Matriz de confusión del mapa final de ocupación y uso del suelo comparado con la verdad terreno destinada para validación. Fecha Mar-21-2000.

	Suelo desnudo	Asent. Humanos	Bosques	Cuerpos de Agua	Agrícola	Selva Baja Caducifolia	TOTAL	Aciertos Usuario	Errores comisión
Suelo desnudo	56	12	0	0	36	2	106	52.8	47.2
Asentamientos humanos	0	969	0	13	523	139	1644	58.9	41.1
Bosques	0	0	8680	0	85	409	9174	94.6	5.4
Cuerpos de Agua	0	0	0	461	0	9	470	98.1	1.9
Agrícola	0	133	37	6	2573	700	3449	74.6	25.4
Selva Baja Caducifolia	0	17	27	11	1199	7469	9223	81.0	19.0
Total	56	1131	9244	491	4416	8728	24066		
<i>Aciertos Productor</i>	100	85.7	93.9	93.3	58.3	85.6			
<i>Errores Omisión</i>	0	14.3	6.1	6.1	41.7	14.4		Índice Kappa	76.59

Como puede observarse, es notorio que la mayor parte de las confusiones están dadas dentro de las categorías de agrícola, suelo desnudo, asentamientos humanos y selva baja caducifolia, aunque desde un principio estas estén identificadas como zonas agrícolas.

El observar el tipo de confusiones presentadas en las matrices, es posible que pueda deberse a que las cubiertas tiendan a reaccionar de manera similar a la energía que emiten, y esto puede deberse a las características, propiedades o estructuras. Por

ejemplo, en el caso de las zonas agrícolas, por sus características ciertos cultivos pueden confundirse con vegetación baja, característica propia de la selva baja caducifolia.

Así mismo, al realizar la verdad terreno, en el caso de las zonas agrícolas existen varias tierras de descanso, es decir que no están siendo cultivadas, y estas pueden confundirse con suelos desnudos o inclusive como zonas de asentamientos humanos, esto al poseer características similares de energía espectral (valores de reflectancia altos).

En general las zonas agrícolas por la actividad que realizan o ejercen sobre ellas, son muy dinámicas, el tipo de riego temporal, anual, los ciclos de producción, resulta arduo categorizarlas de ese modo, así mismo, el tamaño de la superficie, es otro punto donde podría deberse a que presentan cierto tipo de confusión, así mismo asignándolas como selva baja caducifolia, o en su defecto como suelo desnudo o asentamientos humanos.

Tabla 20 Resumen de los principales indicadores de las matrices de confusión aplicadas para la evaluación de los mapas de ocupación y uso de suelo por el método de clasificación de máxima verosimilitud, para las tres fechas de prueba.

Aspecto a evaluar	2000-03-21	2011-02-24	2019-01-29
Error de Omisión	13.76	8.86	13.23
Error de Comisión	23.33	11.56	17.23
Índice Kappa	76.59	86.90	81.20

Con respecto a la tabla 20, se muestra un promedio de los errores de comisión, errores de omisión y el índice Kappa, en el cual se observa que la fecha que menor error obtuvo es la que corresponde al año 2011, y aunque el índice Kappa para las 3 es aceptable, se puede decir que los mapas resultantes son buenos.

De este modo, se concluye la evaluación de la precisión de los mapas resultantes como son el análisis de las matrices de confusión y los derivados como son los errores de comisión y errores de omisión, y por consecuente el índice Kappa.

3.3.4. Mapas finales de ocupación y uso de suelo de las fechas de estudio generados por el método de clasificación supervisada por Máxima Verosimilitud.

En esta sección se muestran los mapas finales de ocupación y uso del suelo de todas las fechas consideradas en el estudio, generados a partir de la metodología propuesta por clasificación supervisada por Máxima Verosimilitud (figs.35, 36 y 37).

Figura No. 35
Mapa de
ocupación y
uso de suelo
resultante para
la fecha de
Mar21-2000.

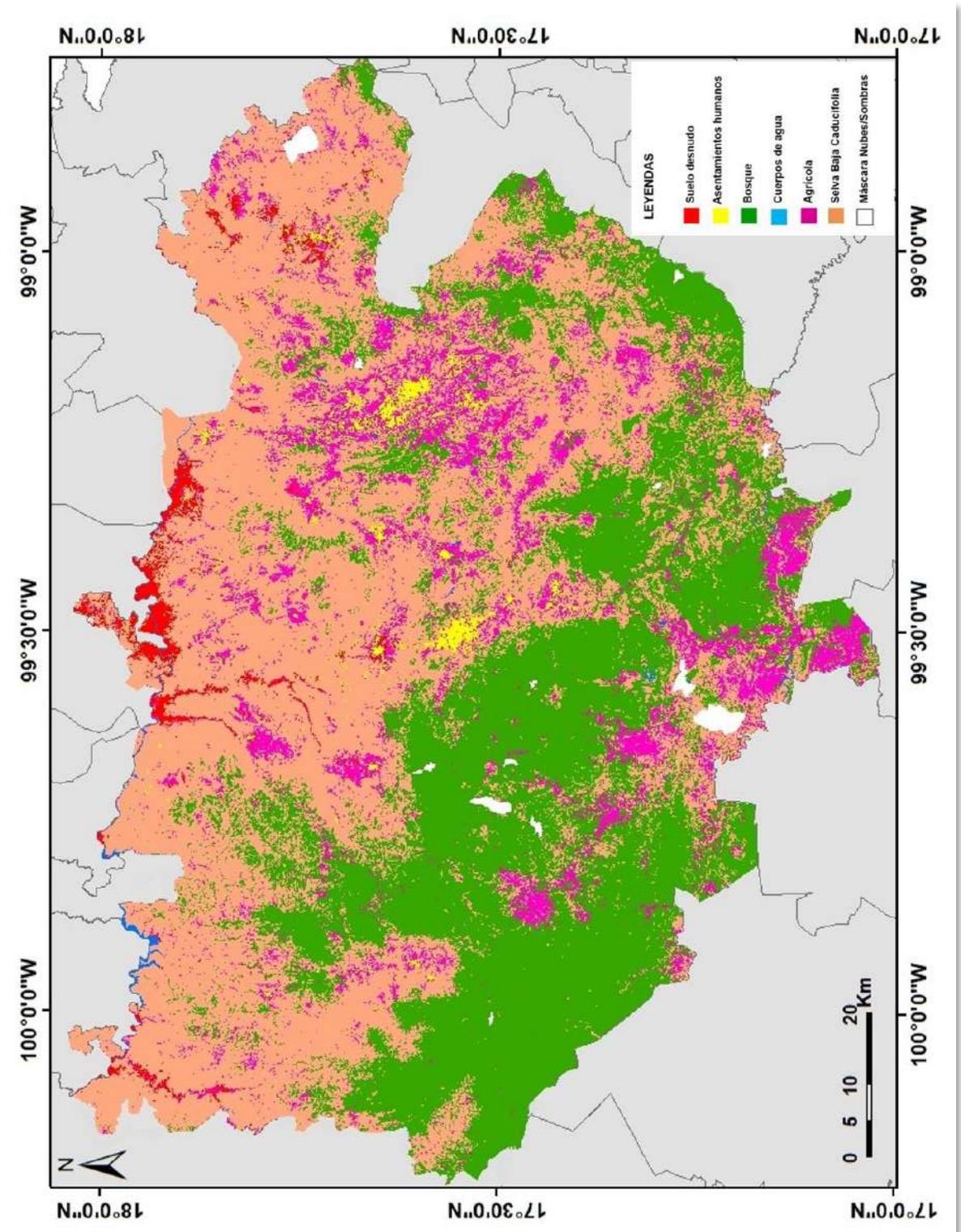


Figura No. 36
Mapa de ocupación y uso de suelo resultante para la fecha de Feb24-2011.

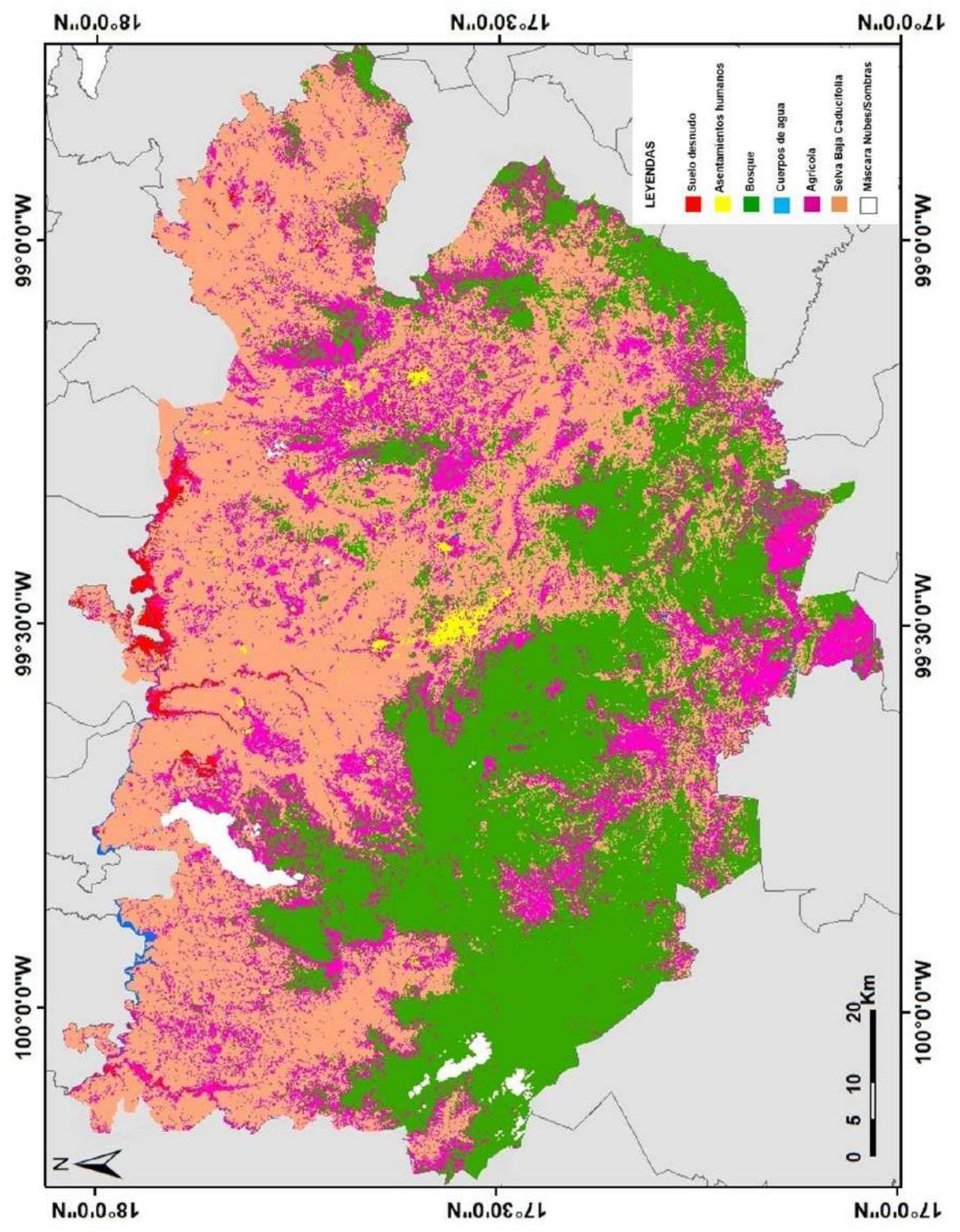
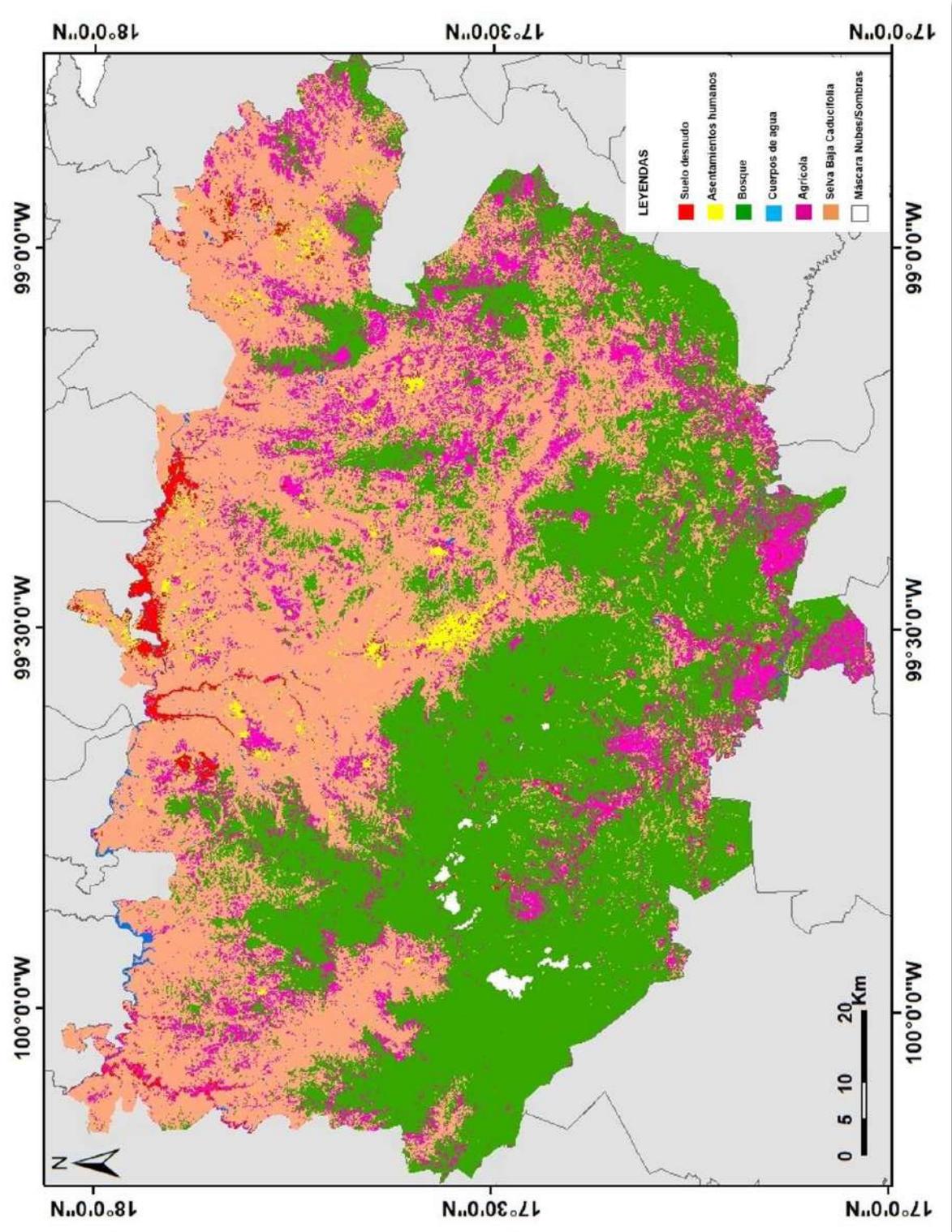


Figura No. 37
Mapa de ocupación y uso de suelo resultante para la fecha de Ene29-2019.



En los mapas es posible constatar la evolución del paisaje, así como los factores que atribuyen a ese cambio. Se puede apreciar que en la zona minera va creciendo conforme va pasando el tiempo y la condición de ocupación del suelo cambia a suelo desnudo resultado de la actividad industrial que se desarrolla en la zona de estudio. Es importante notar algunos casos, tal como el crecimiento urbano puede haber un incremento visual de acuerdo con los mapas generados para las fechas de estudio, al igual que los cuerpos de agua que permanecen prácticamente iguales, como la vertiente del Río Balsas, la laguna de Tixtla, Laguna de Palo Blanco y el Río Omitlán.

Con respecto a las grandes áreas de ocupación tales como bosques y la selva baja caducifolia en general permanecen, sin embargo, es posible observar que ha habido una disminución de la zona y transfiriéndola a la actividad minera que se desarrolla en la región del Estado de Guerrero.

Hasta este punto se ha concluido con el cumplimiento de los objetivos planteados para el presente proyecto. Los productos cartográficos de ocupación y uso del suelo generados podrían eventualmente utilizarse más allá de solo aplicar una exploración visual como la aquí desarrollada; como por ejemplo desarrollar un análisis cuantitativo de la dinámica de ocupación y uso presentada en el periodo, registrando las superficies de categorías permanentes o las superficies cedidas o ganadas (transferencias) entre las categorías de interés. Este análisis queda fuera de los alcances del presente trabajo.

CONCLUSIONES

El método propuesto demostró ser apropiado para dar cumplimiento con el objetivo planteado de desarrollar una metodología para generar cartografía de ocupación y uso de suelo para eventualmente dar soporte a la toma de decisiones en materia de gestión de recursos y conservación del medio ambiente.

En el presente estudio, se desarrollaron mapas de ocupación y uso de suelo para la región centro del Estado de Guerrero, con fechas de Mar21-2000, Feb24-2011 y Ene29-2019. Se trata de una región de interés por el constante crecimiento económico por la influencia de capital extranjero y el constante desarrollo industrial minero. Comprende un importante ecosistema conformado por grandes extensiones de cubiertas de bosque y selva baja caducifolia, los cuales son amenazados por la llegada de las nuevas industrias mineras a la región, provocando alteraciones y cambios importantes de cubiertas por esta actividad.

La metodología explicada, podrían ser implementada en otras regiones del país considerando que la disponibilidad de las imágenes Landsat de libre acceso desde plataformas digitales, representan una gran ventaja como una fuente de información continua y completa, con una resolución adecuada para escalas regionales, así como una temporalidad suficiente desde 1972. Las últimas misiones ofrecen características complementarias, tales como imágenes sobre la calidad (QA) del producto, imágenes multiespectrales con valores de Reflectancia de Superficie o imágenes con información de nubes y sombras.

La disponibilidad de la información Landsat nos brinda la oportunidad de poder generar nuestros propios mapas de ocupación a una escala regional y sobre zonas, fechas y cubiertas de ocupación de interés para el desarrollo de estudios específicos.

Los resultados obtenidos pueden servir como base de estudios sobre la dinámica observada en el periodo, así como las tendencias a futuro sobre la ocupación y uso de suelo, con lo cual eventualmente pueden formularse planes de monitoreo ambiental, planes de gestión territorial, planes de ordenamiento o planes de conservación de los recursos naturales y de los ecosistemas.

Finalmente, debe reconocerse el papel de la ciencia Geomática con sus modelos de conocimiento, sus procedimientos y herramientas geotecnológicas, en el desarrollo de estudios de relevancia que afectan al medio ambiente y a sus habitantes. Estudios que sin duda deben considerar la colaboración activa de la sociedad, primero reconociendo su participación en el deterioro ambiental, pero a la vez reconociendo que es fundamental su contribución como agente activo de cambio para encontrar una solución viable no solo a este problema sino a todos aquellos que involucran a la sociedad con la apropiación y uso de su territorio, involucrando múltiples áreas de conocimiento pero poniendo como eje de discusión siempre el espacio.

REFERENCIAS

- ARIZA, A., 2013. Descripción Y Corrección De Productos Landsat 8 LDCM (Landsat Data Continuity Mission). *Bogotá: Instituto Geográfico Agustín Codazzi*.
- AGARWAL, C., G. M. GREEN, J. MORGAN GROVE, T. P. EVANS AND C. M. SCHWEIK 2002, A review and assessment of land-use change models: dynamics of space, time, and human choice, General Technical Report NE-297, USDA, Forest Service.
- BAIG, M.H.A., ZHANG, L., SHUAI, T. and TONG, Q., 2014. Derivation of a Tasseled Cap Transformation Based on Landsat 8 at-Satellite Reflectance. *Remote Sensing Letters*, vol. 5, no. 5, pp. 423-431 DOI 10.1080/2150704X.2014.915434.
- CAMACHO-SANABRIA, J. M., PÉREZ, J., ISABEL, J., PINEDA-JAIMES, N. B., CADENA-VARGAS, E. G., BRAVO-PEÑA, L. C. and SÁNCHEZ, M. 2015. Cambios de cobertura/uso del suelo en una porción de la Zona de Transición Mexicana de Montaña. *Madera y Bosques*, 21(1), 93-112. doi: 10.21829/myb.2015.211435
- CAMPBELL, J.B. and WYNNE, R.H., 2011. *Introduction to Remote Sensing*. 5a. ed. New York. NY.USA: Guilford Press. ISBN 978-1-60918-176-5.
- CHUVIECO, E., 2010. *Teledetección Ambiental: La Observación De La Tierra Desde El Espacio*. 1a. ed. Madrid, España: Ariel., Oct-2010 ISBN 978-84-344-3498-1.
- COHEN, W.B., & GOWARD, S.N., 2004. Landsat's role in ecological applications of remote sensing. *BioScience*, 54 (6), 535-545
- CONABIO, 2008. Capital Natural de México. Vol. I: Conocimiento actual de la biodiversidad. México, D.F.: Comisión Nacional para el conocimiento y uso de la biodiversidad ISBN 978-607-7607-02-1.
- COUTURIER, S., 2007. *Evaluación de errores de cartas de cobertura vegetal y usos del suelo con enfoque difuso y con la simulación de imágenes de satélite*. Doctorado en Geografía, Facultad de Filosofía y Letras de la UNAM, Instituto de Geografía, UNAM, México: Programa de Doctorado en cotutela UNAM-UPS (Universidad P. Sabatier, Francia).

- COUTURIER, S., GASTELLU-ETCHEGORRY, J., MARTIN, E. and PATIÑO, P., 2013. Building a Forward-Mode Three-Dimensional Reflectance Model for Topographic Normalization of High-Resolution (1-5M) Imagery: Validation Phase in a Forested Environment. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 51, no. 7, pp. 3910-3921.
- CSR-UFMG., 2016. *What is Dinamica EGO?* Centro de Sensoriamento Remoto – Universidade Federal de Minas Gerais ed., Available from: <http://csr.ufmg.br/dinamica/>.
- DUARTE, C.M., et al., 2009. *Cambio Global: Impacto De La Actividad Humana Sobre El Sistema Tierra*. (Segunda Edición) Colección Divulgación, Ministerio de Educación y Ciencia - CSIC ed., Madrid, España: Cyan, Proyectos y Producciones Editoriales, S.A. ISBN 978-84-00-08452-3.
- EASTMAN, JR., 2012. *Manual IDRISI Selva*. Universidad de Clark, Worcester, 324.
- ESRI, 2017. About ArcGIS, the Mapping and Analytics Platform. Available from: <https://www.esri.com/en-us/arcgis/about-arcgis/overview>.
- FAN, Y., KOUKAL, T. and WEISBERG, P.J., 2014. A Sun-crown-sensor Model and Adapted C-Correction Logic for Topographic Correction of High Resolution Forest Imagery. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 96, pp. 94-105. Available from: http://www.cabnr.unr.edu/weisberg/publications/Fan_2014_isprs.pdf.
- FERRERO, S., PALACIO, M. and CAMPANELLA, O.R., 2002. Análisis De Componentes Principales En Teledetección. Consideraciones Estadísticas Para Optimizar Su Interpretación. *Revista De Teledetección*, vol. 17, pp. 43-54.
- FREEMAN, M. C., PRINGLE, C. M. Y JACKSON, C. R. (2007). Hydrologic Connectivity and the Contribution of Stream Headwaters to Ecological Integrity at Regional Scales. *Journal of the American Water Resources Association*, 43(1), 5-14. Recuperado de: <http://doi.org/10.1111/j.1752-1688.2007.00002.x>.
- GILABERT, M.A., GONZÁLEZ-PIQUERAS, J. and GARCÍA-HARO, J., 1997. Acerca De Los Índices De Vegetación. *Revista De Teledetección*, vol. 8, no. 10. Available from: http://telenet.fa1.cie.uva.es/promotores/revista/revista_08/AET8_4.pdf.
- GÓMEZ ALMONTE, M. (2012). Índice de vegetación en áreas del bosque seco del noroeste del Perú a partir de imágenes satelitales.

- GOODCHILD, M., HAINING, R. and WISE, S., 1992. Integrating GIS and Spatial Data Analysis: Problems and Possibilities. *International Journal of Geographical Information Systems*, vol. 6, no. 5, pp. 407-423.
- GU, D. and GILLESPIE, A., 1998. Topographic Normalization of Landsat TM Images of Forest Based on Subpixel Sun-canopy-sensor Geometry. *Remote Sensing of Environment*, vol. 64, pp. 166-175.
- HELMER, E. H. O., RAMOS, T DEL M. LÓPEZ, M. QUIÑONES, AND W. DÍAZ, 2002. Mapping the forest type and Land Cover of Puerto Rico, a Component of the Caribbean Biodiversity Hospot. *Caribbean/journal of Science*, Vol. 38, No. 3-4, 165-158, 2002. Copyright 2002 College of Arts and Sciences University of Puerto Rico, Mayaguez. 19 p.
- INEGI, 2017. Acerca de INEGI, servicios: <https://www.inegi.org.mx/servicios/>
- INEGI, 2015. *Guía Para La Interpretación De Cartografía: Uso Del Suelo y Vegetación: Escala 1:250, 000: Serie V. Cartografía - Estudio y enseñanza*. ed. México: Instituto Nacional de Estadística y Geografía.
- JACKSON, R.D., 1983. Spectral Indices in N-Spaces. *Remote Sensing of Environment*, vol. 13, no. 5, pp. 409-421.
- KNIGHT, E.J. and KVARAN, G., 2014. Landsat-8 Operational Land Imager Design, Characterization and Performance. *Remote Sensing*, vol. 6, no. 11, pp. 10286-10305 DOI 10.3390/rs61110286.
- LANDA, R., MEAVE, J. and CARABIAS, J., 1997. Environmental Deterioration in Rural Mexico: An Examination of the Concept. *Ecological Applications*, vol. 7, no. 1, pp. 316-329.
- MCGARIGAL, K. and MARKS, B.J., 1995. Spatial Pattern Analysis Program for Quantifying Landscape Structure. *Gen.Tech.Rep.PNW-GTR-351.US Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Northwest Research Station*.
- MARTINEZ-GIRON, GERARDO, Aspectos técnicos a imágenes Landsat, INEGI. Dirección General de Geografía y Medio Ambiente, 2015.
- MAS, J., et al, 2004. Assessing Land use/Cover Changes: A Nationwide Multidate Spatial Database for Mexico. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, vol. 5, no. 4, pp. 249-261.

- MAS, J. and FERNANDEZ, T., 2003. Una Evaluación Cuantitativa De Los Errores En El Monitoreo De Los Cambios De Cobertura Por Comparación De Mapas. *Investigaciones Geográficas*, no. 51, pp. 73-87.
- MAS, J., PÉREZ-VEGA, A. and CLARKE, K.C., 2012. Assessing Simulated Land use/Cover Maps using Similarity and Fragmentation Indices. *Ecological Complexity*, vol. 11, pp. 38-45. Available from: <http://www.ugto.mx/investigacionyposgrado/images/publicaciones/2012/249-Perez-Vega-Gto.pdf> DOI 10.1016/j.ecocom.2012.01.004.
- MAS, J., VELÁZQUEZ, A. and COUTURIER, S., 2008. La evaluación de los cambios de cobertura/uso del suelo en la Republica Mexicana. *Investigación Ambiental*, vol. 1, pp.23-39. Available from: <http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones/download/604.pdf#page=24>.
- MASEK, J.G., et al, 2006. A Landsat Surface Reflectance Dataset for North America, 1990-2000. *Geoscience and Remote Sensing Letters, IEEE*, vol. 3, no. 1, pp. 68-72.
- MASERA, O.R., 1996. *Desforestación Y Degradación Forestal En México estado Actual Y Perspectivas a Largo Plazo. Documento De Trabajo Núm. 19*. Pátzcuaro, Michoacán, México: Grupo Interdisciplinario de Tecnología Rural Apropiada.
- MISHRA N, HAQUE M, LEIGH L, AARON D, HELDER D, AND MARKHAM B, 2014, Radiometric Cross Calibration of Landsat 8 Operational Land Imager (OLI) and Landsat 7 Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+), *Remote Sensing*, 6(12), 12619–12638, doi: 10.3390/rs61212619.
- MORENO, A., 2006. Sistemas Y Análisis De La Información Geográfica: Manual De Autoaprendizaje Con ARC Gis. *Cuadernos Geográficos*, vol. 39, no. 2, pp. 231-233.
- NATURAL RESOURCES CANADA, 2015., *Fundamentals Remote Sensing*. CANADÁ.
- NÁJERA-VALLE, S., VÁZQUEZ-JIMÉNEZ, R., RAMOS-BERNAL, R. N., and ZUÑIGA-GUTIERREZ, M., Análisis de la ocupación y uso de suelo en el Municipio de Acapulco de Juárez, Guerrero, México, durante el periodo 2003 al 2013. *Revista Académica del Quehacer Universitario*, Junio 2018, Vol. 1, No. 1. 2018.

- OLOFSSON, P., FOODY, G. M., HEROLD, M., STEHMAN, S. V., WOODCOCK, C. E. and WULDER, M. A. 2014. Good practices for estimating area and assessing accuracy of land change. *Remote Sensing of Environment*, 148, 42-57. doi: 10.1016/j.rse.2014.02.015
- ORDÓÑEZ, F., ROSETE, O., MASERA, B. and JONG, F., 2000. *Dinámica De Cambio En La Cobertura Forestal Y Uso Del Suelo Asociada a Los Almacenes Y Emisiones De Carbono: El Caso De Santiago Tingambato, Michoacán*. Morelia, Mich., México.: Centro de Investigación en Ecosistemas, UNAM.
- PEÑA-CORTÉS, F., PINCHEIRA-ULBRICH, J., ESCALONA-ULLOA, M. Y REBOLLEDO, G. (2011). Cambio de uso del suelo en los geosistemas de la cuenca costera del río Boroa (Chile) entre 1994 y 2004. *Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias. Universidad Nacional de Cuyo*, 43(2), 1-20.
- PRIEGO, A. BOCCO, G., MENDOZA, M. and GARRIDO, A., 2010. *Propuesta para la generación semiautomatizada de unidades de paisajes. Fundamentos y métodos*. México, D.F.: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales; Instituto Nacional de Ecología; Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental; Universidad Nacional Autónoma de México; Available from: http://www.emapas.inecc.gob.mx/download/paisaje_unidades_paisaje.pdf. ISBN 978-968-.
- PROY, C., TANRE, D. and DESCHAMPS, P., 1989. Evaluation of Topographic Effects in Remotely Sensed Data. *Remote Sensing of Environment*, vol. 30, no. 1, pp. 21-32.
- RAMOS-BERNAL, 2019. *Tesis Doctoral: Estudio de la susceptibilidad al deslizamiento de laderas en el Estado de Guerrero, México, aplicando Tecnologías de Información Geográfica*. Madrid, Spain: Escuela Superior de Ciencias Experimentales y Tecnología, Universidad Rey Juan Carlos.
- REESE, H. and OLSSON, H., 2011. C-Correction of Optical Satellite Data Over Alpine Vegetation Areas: A Comparison of Sampling Strategies for Determining the Empirical C-Parameter. *Remote Sensing of Environment*, vol. 115, no. 6, pp. 1387-1400. Available from: http://pub.epsilon.slu.se/8353/1/Reese_H_Olsson_H_111005.pdf.
- RIPLEY, B.D., 1981. *Spatial Statistics*. John Wiley & Sons ISBN 0-471-691 16-X.
- ROBINOVE, C.J., 1981. The Logic of Multispectral Classification and Mapping of Land. *Remote Sensing of Environment*, vol. 11, pp. 231-244.

- ROMERO-ROJAS, W. 2017. *Aplicación de herramientas geotecnológicas para la evaluación de susceptibilidad a procesos de remoción de masa en la zona centro del Estado de Guerrero*. Universidad Autónoma de Guerrero, Facultad de Ingeniería.
- SALAZAR, E. d. C., ZAVALA, J., CASTILLO, O. and CÁMARA, R., 2004. Evaluación Espacial Y Temporal De La Vegetación De La Sierra Madrigal, Tabasco, México (1973-2003). *Investigaciones Geográficas*, no. 54, pp. 7-23.
- SALITCHEV, K., 1979. *Cartografía*. La Habana (Cuba). Pueblo y Educación.
- SÁNCHEZ COLÓN, S., MARTÍNEZ, A.F., CRUZ-LEYVA, I. and VELÁZQUEZ, A., 2008. Estado Y Transformación De Los Ecosistemas Terrestres Por Causas Humanas. II Estudio De País. *CONABIO, México*.
- SARRÍA, F.A., 2006. *Sistemas De Información Geográfica*. Universidad De Murcia.
- SCHROEDER, TA; COHEN, WB; SONG, CH; CANTY, MJ and YANG, ZQ, 2006. Corrección radiométrica de datos de Landsat multitemporales para la caracterización de patrones forestales sucesionales tempranos en el oeste de Oregon . *Remote Sensing of Environment*, 103: 16 – 26.
- SOARES-FILHO, B.S., RODRIGUES, H.O. and COSTA, W., 2009. Modeling Environmental Dynamics with Dinámica EGO. *Centro De Sensoriamento Remoto. Universidade Federal De Minas Gerais. Belo Horizonte, Minas Gerais*, vol. 115.
- SOARES-FILHO, B.S., CERQUEIRA, G.C. and PENNACHIN, C.L., 2002. DINAMICA – a Stochastic Cellular Automata Model Designed to Simulate the Landscape Dynamics in an Amazonian Colonization Frontier. *Ecological Modelling*, vol. 440, no. 7083, pp. 520-523.
- SOENEN, S.A., PEDDLE, D.R. and COBURN, C.A., 2005. A Modified Sun-Canopy-Sensor Topographic Correction in Forested Terrain. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions On*, vol. 43, no. 9, pp. 2148-2159. Available from: http://bgs.ucalgary.ca/files/bgs/soenen_peddle_2005.pdf DOI 10.1109/TGRS.2005.852480.
- TURNER, M.G., GARDNER, R.H. and O'NEILL, R.V., 2001. *Landscape Ecology in Theory and Practice*. Springer.

- USGS, 2016. Landsat-Earth Observation Satellites; <http://dx.doi.org/10.3133/fs20153081>
- USGS, 2015b. Provisional Landsat 8 Surface Reflectance Product. Product Guide. Department of the Interior U.S. Geological Survey ed., Versión 1.7 ed. Department of the Interior U.S. Geological Survey.
- USGS, 2015a. Landsat 4-7 Climate Data Record (CDR) 0Surface Reflectance Product. Product Guide. Department of the Interior U.S. Geological Survey ed., Version 6.0 ed. Department of the Interior U.S. Geological Survey.
- VÁZQUEZ-JIMÉNEZ, R., 2011. *Solución Geomática Para Cuencas Hidrográficas. Una Aproximación Desde Los Sistemas Socioecológicos Complejos*. México, D.F.: Centro de investigación en Geografía Geomática "Ing. Jorge L. Tamayo" A.C. Centro Geo.
- VÁZQUEZ-JIMÉNEZ, R., 2017. *Tesis Doctoral: Método Alternativo Para La Elaboración De Cartografía Consistente De Ocupación y Uso Del Suelo, Orientado a Estudios De Dinámica Territorial*. Madrid, Spain: Escuela Superior de Ciencias Experimentales y Tecnología, Universidad Rey Juan Carlos.
- VÁZQUEZ-JIMÉNEZ, R., et al, 2017a. Applying the Chi-Square Transformation and Automatic Secant Thresholding to Landsat Imagery as Unsupervised Change Detection Methods. *Journal of Applied Remote Sensing*, vol. 11, no. 1, pp. 016016 DOI <https://doi.org/10.1117/1.JRS.11.016016>.
- VÁZQUEZ-JIMÉNEZ, R., et al, 2017. Topographic Correction to Landsat Imagery through Slope Classification by Applying the SCS+C Method in Mountainous Forest Areas. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, vol. 6, no. 9, pp. 287 DOI [10.3390/ijgi6090287](https://doi.org/10.3390/ijgi6090287).
- VELDKAMP, A. and LAMBIN, E.F., 2001. Predicting Land-use Change. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, vol. 85, no. 1, pp. 1-6.
- VELDKAMP, A. AND L. O. FRESCO, 1996, "CLUE: a conceptual model to study the conversion of land use and its effects", *Ecological Modeling*, no. 85, pp. 253-270.
- VELÁZQUEZ, A., MAS, J. F., GALLEGOS, J. D., SAUCEDO, R. M., ALCÁNTARA, P. C., CASTRO, R., ... & PALACIO, J. L. (2002). Patrones y tasas de cambio de uso del suelo en México. *Gaceta ecológica*, (62), 21-37.

VITOUSEK, P.M., MOONEY, H.A., LUBCHENCO, J. and MELILLO, J.M., 1997. Human Domination of Earth's Ecosystems. *Science*, vol. 277, no. 5325, pp. 494-499 ISSN 0036-8075; online ISSN 1095-9203. DOI 10.1126/science.277.5325.494.

VICTORIA, H.A., NIÑO, A.M. and RODRIGUEZ, A.J.A., 2013. La serie IV de uso del suelo y vegetación escala 1:250,000 de INEGI, información del periodo 2007-2008. In: S.M.T. SÁNCHEZ, V.G. BOCCO and I.J.M. CASADO eds., La política de ordenamiento territorial en México: de la teoría a la práctica. UNAM, CIGA, INECC-SEMARNAT. *La Serie IV De Uso Del Suelo Y Vegetación Escala 1:250,000 De INEGI, Información Del Periodo 2007-2008*, pp. 243-267 ISBN 978-607-02-4848-1.