

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA
Facultad de Ingeniería



Análisis multitemporal de la dinámica urbana del municipio de Cobán, Alta Verapaz, en los años 1990, 2000 y 2015, basado en técnicas de teledetección, mediante el uso de Sistemas de Información Geográfica.

Trabajo de graduación presentado por Kenneth Manuel Haroldo Catún Guevara para optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería Civil

Guatemala,

2019

Análisis multitemporal de la dinámica urbana del municipio de Cobán, Alta Verapaz, en los años 1990, 2000 y 2015, basado en técnicas de teledetección, mediante el uso de Sistemas de Información Geográfica.

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA
Facultad de Ingeniería



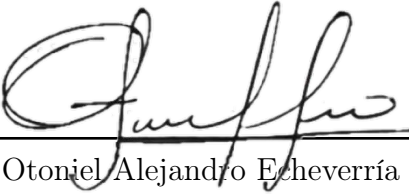
Análisis multitemporal de la dinámica urbana del municipio de Cobán, Alta Verapaz, en los años 1990, 2000 y 2015, basado en técnicas de teledetección, mediante el uso de Sistemas de Información Geográfica.

Trabajo de graduación presentado por Kenneth Manuel Haroldo Catún Guevara para optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería Civil

Guatemala,

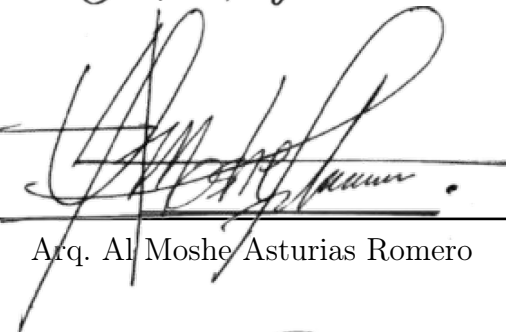
2019


Vo.Bo.:

(f) 
Ing. Otoniel Alejandro Echeverría Castellanos

Tribunal Examinador:

(f) 
Ing. Otoniel Alejandro Echeverría Castellanos

(f) 
Arq. Al Moshe Asturias Romero

(f) 
Ing. Rodrigoandrés Morales Ortega

Fecha de aprobación: Guatemala, 3 de Diciembre de 2019.

Este trabajo, el cual es la culminación de esta tan importante etapa, la universitaria, va dedicado a:

- En primer lugar, a Dios, por nunca abandonarme, por sostenerme todo este tiempo y por permitirme culminar esta etapa.
- A la Virgen María por acompañarme a lo largo de este caminar y porque gracias a ella he podido cultivar mi fe.
- A mis padres, Haroldo Catún y Luvia Guevara, por ser uno de los pilares de mi vida, por todas y cada una de sus enseñanzas, por su esfuerzo y entrega sin medida, y por ser un ejemplo para sus cuatro hijos, a los que han sacado adelante y de los cuales han sido excelentes padres.
- A mi hermana Samantha, por ser una mujer extraordinaria, luchadora, soñadora e incansable, la cual ha sido siempre uno de mis más grandes apoyos y ejemplos a seguir en la vida, tanto en lo académico como en lo humano.
- A mis hermanos Dulce y Harold, por ser un apoyo constante y unos grandes hermanos, y por ser parte de mi motivación para conseguir este logro.
- A la Fundación Juan Bautista Gutiérrez, por la oportunidad que me brindaron con la Beca Universitaria, por todo su apoyo y por todo cuanto esa beca trajo consigo.
- A Doña Isabelita, Evelyn Barrascouth, Evelyn Hernández, Karin Carranza y a todo el equipo que conforma la Fundación Juan Bautista Gutiérrez, por el apoyo brindado durante estos más de cinco años.
- A Diego Martínez y a la familia Martínez Márquez, por abrirme las puertas de su hogar y por considerarme un miembro más, y permitirme vivir junto a ellos tantas bonitas e inolvidables experiencias.
- A Jaime López y a su familia y por todas las atenciones y bondades hacia mi persona.

- A todos mis profesores, por todas las enseñanzas y experiencias tanto dentro como fuera de las aulas.
- A Edin Pretzantín, mi director de piso, preceptor y sobre todo un gran amigo, que me ha ayudado a crecer espiritualmente y con el que compartido muchas experiencias a lo largo de este viaje.
- A la Universidad del Valle de Guatemala, por ser mi alma máter y por recibirme con los brazos abiertos en su aulas y demás instalaciones, y de la cual me siento orgulloso tanto en mi etapa de estudiante, como de egresado.
- A mis amigos, Andrés, Iván, José Angel, José Miguel; por todas las experiencias y vivencias que con ellos hemos pasado.

Prefacio	VI
Lista de figuras	XII
Lista de cuadros	XIII
Resumen	XV
Abstract	XVII
1. Introducción	1
2. Objetivos	3
2.1. Objetivo general	3
2.2. Objetivos específicos	3
3. Marco teórico	5
3.1. Historia de la teledetección	5
3.2. Aplicaciones de tipo urbano de la teledetección	7
3.3. Energía electromagnética	8
3.3.1. Espectro electromagnético	10
3.4. Factores que afectan el comportamiento de la energía electromagnética	11
3.4.1. Interacciones específicas de la atmósfera con la radiación electromagnética	14
3.4.2. Características de las principales cubiertas en el espectro óptico	16
3.5. Sensores remotos	20
3.6. Sensores activos y pasivos	20
3.7. Plataformas de teledetección espacial	21
3.7.1. Programa LANDSAT	22
3.7.2. El satélite SPOT	22
3.7.3. Tiros - NOAA	24
3.8. Resoluciones de un sistema sensor	24
3.8.1. Resolución espacial	24

3.8.2.	Resolución espectral	24
3.8.3.	Resolución radiométrica	25
3.8.4.	Resolución temporal	25
3.8.5.	Resolución angular	25
3.9.	Imágenes satelitales	26
3.10.	Teledetección e imágenes LANDSAT	27
3.10.1.	Ventajas de las imágenes LANDSAT	30
3.11.	Procesamiento de imágenes	31
3.11.1.	Correcciones radiométricas	31
3.11.2.	Realces	31
3.11.3.	Correcciones geométricas	32
3.11.4.	Georreferenciación	32
3.11.5.	Ortorrectificación de imágenes	33
3.12.	Clasificación de imágenes	33
3.12.1.	Clasificación supervisada	33
3.12.2.	Clasificación no supervisada	35
3.13.	Verificación de resultados	35
3.14.	Fuentes de error en una clasificación temática	35
3.14.1.	Estructura del territorio	35
3.14.2.	Adquisición de las imágenes	36
3.14.3.	Condiciones medioambientales	36
3.15.	Tamaño de la muestra	36
3.16.	Matrices de confusión	37
3.16.1.	Coefficiente Kappa	40
3.17.	Análisis multitemporal	41
3.18.	Sistemas de información geográfica (SIG)	41
3.19.	Aplicaciones de los SIG	42
3.20.	Teledetección y SIG	44
3.21.	Software QGIS	44
3.22.	Complemento SCP de QGIS	46
4.	Marco metodológico	49
4.1.	Área de estudio	49
4.2.	Procesamiento de imágenes satelitales	50
4.2.1.	Conversión de la imagen a reflectancia: Corrección DOS1	50
4.2.2.	Creación del archivo multispectral	51
4.3.	Clasificación de las imágenes y áreas de entrenamiento	51
4.3.1.	Clasificación	51
4.3.2.	Áreas de entrenamiento	52
4.3.3.	Análisis de separabilidad	56
4.4.	Validación de la clasificación	58
4.4.1.	Diseño y tamaño de la muestra	58
4.4.2.	Construcción de las matrices de confusión	59
4.4.3.	Cálculo de estadísticos de la matriz de confusión	61

5. Resultados y discusión	63
5.1. Resultados para el año 1990	63
5.2. Resultados para el año 2000	66
5.3. Resultados para el año 2015	68
6. Conclusiones	73
7. Recomendaciones	75
8. Bibliografía	77
9. Anexos	79
10. Glosario	97

Lista de figuras

1.	Principio de teledetección.	8
2.	Onda electromagnética	9
3.	Espectro electromagnético.	10
4.	Interacción de la radiación con la materia.	12
5.	Firmas espectrales.	13
6.	Firma espectral de la vegetación sana.	17
7.	Espectros de laboratorio para distintos minerales.	19
8.	Sensores activos y pasivos.	21
9.	Sistema de adquisición de imágenes estereoscópicas que realiza el satélite SPOT.	23
10.	Resoluciones de diferentes satélites y sensores remotos.	26
11.	Estructura de las imágenes satelitales.	26
12.	Características de las imágenes del programa LANDSAT 1 a LANDSAT 5.	28
13.	Características de las imágenes del programa LANDSAT 7 y 8.	29
14.	Georreferenciación de imágenes.	32
15.	Métodos de asignación de píxeles a una categoría.	34
16.	Ejemplo de matriz de confusión entre clases.	37
17.	Interfaz de usuario del software QGIS.	45
18.	Ventana de funciones principales del complemento SCP.	46
19.	Complemento SCP de QGIS.	47
20.	Municipio de Cobán, Alta Verapaz.	49
21.	Conversión de la imagen a reflectancia.	51
22.	Composiciones RGB, año 1990	53
23.	Composiciones RGB, año 2000	54
24.	Composiciones RGB, año 2015	54
25.	Firmas espectrales de las áreas de entrenamiento, calculados en QGIS 3.6	57
26.	Malla de puntos de validación de clasificación para la imagen del año 1990.	59
27.	Zona urbana del municipio de Cobán hacia el año 1990.	65
28.	Zona urbana de la ciudad de Cobán, de la clasificación de uso de suelo para el año 1990.	65
29.	Zona urbana del municipio de Cobán hacia el año 2000.	67

30.	Zona urbana de la ciudad de Cobán, de la clasificación de uso de suelo para el año 2000.	68
31.	Zona urbana del municipio de Cobán hacia el año 2015.	70
32.	Zona urbana de la ciudad de Cobán, de la clasificación de uso de suelo para el año 2015.	70
33.	Comparativa de la zona urbana de la ciudad de Cobán para los tres años de estudio (Año 1990 - Rojo, Año 2000 - Verde, Año 2015 - Amarillo).	72

Lista de cuadros

1.	Características del sensor HRV – SPOT.	23
2.	Características de las plataformas LANDSAT.	30
3.	Categorías de concordancia de validación para el coeficiente Kappa	41
4.	Listado de imágenes LANDSAT.	50
5.	Macroclases empleadas para la clasificación de imágenes.	52
6.	Dimensiones de las áreas de entrenamiento expresada en píxeles.	55
7.	Separabilidad espectral de los campos de clasificación.	56
8.	Matriz de confusión, año 1990, expresada en número de puntos.	61
9.	Matriz de confusión, año 1990, expresada en número de puntos.	64
10.	Matriz de confusión, año 2000, expresada en número de puntos.	66
11.	Matriz de confusión, año 2015, expresada en número de puntos.	69
12.	Exactitudes globales, intervalos de fiabilidad e índices Kappa.	71
13.	Comportamiento de la expansión urbana del municipio de Cobán, período 1990-2015.	71
14.	Puntos aleatorios de validación para la clasificación del año 1990.	79
15.	Puntos aleatorios de validación para la clasificación del año 2000.	82
16.	Puntos aleatorios de validación para la clasificación del año 2015.	86

El estudio de los núcleos urbanos en Guatemala ha sido escasamente abordado, -tanto en la metrópoli como en las provincias del país- de manera que no se cuenta con datos acerca del crecimiento de las ciudades y conglomerados urbanos, lo cual representa un problema significativo a la vista que no se cuenta con conocimiento acerca del comportamiento y crecimiento de estos.

En este trabajo se desarrolló un análisis multitemporal de los cambios producidos en la mancha urbana del municipio de Cobán, ubicado en el departamento de Alta Verapaz; como producto del crecimiento demográfico y del aumento de la zona urbana del municipio, basándose para ello en técnicas de teledetección, mediante el uso de imágenes Landsat TM, ETM+ y OLI, con el fin de analizar el comportamiento, tendencias y patrones espacio-temporales producidos durante el período comprendido para el estudio, el cual se ubicó entre los años 1990 y 2015.

Para ello se desarrollaron clasificaciones supervisadas de cobertura y uso de suelo a través del complemento SCP (complemento de clasificación semiautomática) del programa QGIS 3.6 para tres años específicos, siendo estos los años 1990, 2000 y 2015 a fin de comparar la mancha urbana a lo largo del período de estudio. Asimismo se determinaron las tasas de crecimiento de la mancha urbana en el período analizado, tanto entre los años 1990 a 2000, como del año 2000 al 2015, obteniéndose tasas de crecimiento anual de 0.48 km^2 para el primer lapso, y una tasa de 0.65 km^2 para el segundo, mostrando que el comportamiento se ha acelerado desde el inicio del nuevo siglo, que ha significado una ganancia de más de 14 km^2 de superficie urbana del inicio al final del período estudiado.

Finalmente, los resultados fueron validados a través de matrices de confusión para cada clasificación y de los correspondientes índices Kappa, los cuales cuantifican el nivel de exactitud de las clasificaciones generadas, sugiriendo los resultados para estos parámetros que las clasificaciones son confiables y válidas.

Palabras clave: Teledetección, cobertura de suelo, clasificación supervisada, análisis multitemporal, tasa de crecimiento urbano, sistemas de información geográfica, Cobán.

The study of urban centers in Guatemala has been scarcely addressed - both in the metropolis and in the provinces of the country - so that there is no data on the growth of urban cities and conglomerates, which represents a significant problem to the view that is not covered with knowledge about their behavior and growth.

In this work a multitemporal analysis of the changes produced in the urban spot of the municipality of Cobán, located in the department of Alta Verapaz; as a product of the demographic growth and the growth of the urban area of the municipality, based on remote sensing techniques, using Landsat TM, ETM+ and OLI images, in order to analyze the behavior, trends and spatio-temporal patterns produced during the period covered by the study, which was located between 1990 and 2015.

For this purpose, supervised land cover and land use classifications were developed through the SCP complement (semi-automatic classification plugin) of the QGIS 3.6 program for three specific years, these being the years 1990, 2000 and 2015 in order to compare urban stain throughout the study period. Likewise, the rates of growth of the urban spot were also determined in the analyzed period, both between 1990 and 2000, and from 2000 to 2015, obtaining growth rates of 0.48 km^2 for the first period, and a rate of 0.65 km^2 for the second, showing that the behavior has accelerated since the beginning of the new century, which has meant a gain of more than 14 km^2 of urban area from the beginning to the end of the period studied.

Finally, the results were validated through confusion matrices for each classification and the corresponding Kappa indices, which quantify the level of accuracy of the generated classifications, suggesting the results for these parameters that the classifications are reliable and valid.

Keywords: Remote sensing, land cover, supervised classification, multitemporal analysis, urban growth rate, geographic information systems, Cobán.

El crecimiento de las zonas urbanas es un tema de gran importancia para entender el desarrollo temporal y espacial de las ciudades a lo largo del tiempo. Es un fenómeno que se presenta de manera indistinta en todos los países y ciudades alrededor del mundo, como producto del crecimiento demográfico y del propio desarrollo de las naciones.

En el caso de Guatemala, el crecimiento de las zonas humanas ha sido escasamente abordado, por lo que en esta materia no se cuentan con registros de este fenómeno, principalmente en las provincias del país, en donde tanto los recursos, como iniciativas son más escasos que en la metrópoli.

A la vista de este panorama, el presente estudio busca analizar el comportamiento de la dinámica urbana, referida específicamente a la mancha urbana del municipio de Cobán, ubicado en el departamento de Alta Verapaz. Dicho análisis, de carácter multitemporal, consideró la zona urbana del municipio a lo largo de 25 años a partir de la década de 1990, tomando como puntos de estudio los años 1990, 2000 y 2015. Todo esto con el fin de observar los cambios y crecimiento producidos desde final del siglo pasado hasta la actualidad.

Dicho estudio se elaboró a través del empleo de técnicas de teledetección, las cuales están íntimamente relacionadas con herramientas de percepción remota, así como a través del uso de herramientas computacionales tales como lo son los sistemas de información geográfica (SIG).

Para ello se hizo uso de imágenes satelitales de la zona, obtenidas de la plataforma LANDSAT, siendo generadas clasificaciones de tipo supervisado de la cobertura de suelo para los tres años que comprenden el estudio, en las que se determinó la mancha urbana del área de interés, a través el uso del complemento de clasificación semiautomática, SCP (Semi-automatic Classification Plugin, en inglés) del programa QGIS, en su versión 3.6, que fue el sistema de información geográfica utilizado para la realización de este estudio.

Asimismo, fueron determinadas las tasas de crecimiento urbano y se analizó el comportamiento de la mancha urbana tanto a nivel general del municipio como de la ciudad de

Cobán a lo largo del período que fue contemplado para el estudio.

Aunado a ello, se realizó la validación de las clasificaciones generadas por el programa a través de métodos matriciales, los cuales son los aplicables para este tipo de estudio, en vista de cuantificar la exactitud y validez del estudio realizado.

2.1. Objetivo general

Implementar, mediante técnicas de teledetección un análisis multitemporal de la dinámica urbana del municipio de Cobán, Alta Verapaz, a través del uso de Sistemas de Información Geográfico –SIG–.

2.2. Objetivos específicos

- Analizar desde el punto de vista temporal, la dinámica del uso de suelo del municipio de Cobán, Alta Verapaz, tomando como base para este análisis información obtenida de imágenes satelitales de la zona.
- Calcular las tasas de cambio de uso de suelo urbano del municipio de Cobán, departamento de Alta Verapaz a lo largo de las últimas tres décadas.
- Validar la clasificación de uso de suelo del municipio de Cobán, a fin de medir el nivel de exactitud y precisión alcanzados en el estudio.
- Establecer y comparar las tasas de crecimiento de la cobertura urbana del municipio de Cobán en vista de conocer el comportamiento de la mancha urbana de la zona de estudio.

3.1. Historia de la teledetección

La teledetección es una técnica de tipo aplicada, y como tal, está íntimamente ligada al nivel y estado de desarrollo tecnológico existente en cada momento específico en el tiempo. Por cuanto en ella convergen aspectos muy variados –ópticas y detectores del sensor, vehículos que lo sustenta, sistemas de transmisión, equipos de tratamiento, entre muchos otros–, las formas de teledetección han ido cambiando ostensiblemente en las últimas décadas. El crecimiento ha sido sumamente vertiginoso, facilitando y propiciando una progresión muy notable, tanto en lo referido a la cantidad, como en la variedad y calidad de la información disponible para campos científicos muy variados [1].

Las primeras experiencias de teledetección se remontan al año de 1859, cuando Gaspar Félix de Tournachon, obtiene las primeras fotografías aéreas desde un globo de cultivo. Al año siguiente, James Wallace repite esta misma experiencia sobre la ciudad de Boston, poniéndose en evidencia el interés de la nueva perspectiva aérea para un conocimiento más detallado de la organización urbana [1].

Los años siguientes a estos sucesos dieron paso a un importante desarrollo de la observación fotográfica, ahora realizada desde aviones, gracias a los importantes progresos realizados en ópticas y emulsiones. En el año de 1909, Wilbur Wright adquiere la primera fotografía aérea, abriendo de esa cuenta el camino a una larga historia de observación desde plataformas remotas. La primera cámara aérea propiamente dicha se desarrolla durante el primer conflicto bélico, concretamente en el año de 1915, por J.T.C.Moore-Barbazon. La importancia estratégica de este escrutinio queda pronto en evidencia, desarrollándose notablemente las técnicas de adquisición y procesado fotográfico [1].

Será entonces, hasta la Segunda Guerra Mundial, cuando se produzca un notable desarrollo de las técnicas de teledetección aérea. El progreso se orienta a mejorar la óptica de las cámaras de reconocimiento, así como las emulsiones utilizadas (de esta época proceden las primeras películas en infrarrojo, desarrolladas por Kodak Research Laboratories). Asimismo,

se introducen nuevos sensores, como el radar, y se mejoran los sistemas de comunicación. Por otra parte, la aeronáutica sufre un crecimiento y progreso notable, lo que le confiere mayor estabilidad a las plataformas de observación [1].

Todas estas innovaciones introducidas para entonces son aplicadas posteriormente a usos de naturaleza civil, lo que muestra las múltiples aplicaciones de esta exploración aérea para el mejor conocimiento y control de los recursos naturales. En los años de posguerra se producen las mejoras a los sistemas de radar, introduciendo el radar lateral aerotransportado (SLAR), y se ponen a punto sensores térmicos de barrido [1].

A finales de los años 50, el desarrollo de los sistemas de navegación permite concebir los primeros ingenios espaciales. La denominada “Guerra Fría” tiene en el espacio uno de sus objetivos preferentes y más importantes, alentándose desde uno y otro bando una intensa investigación en estos temas. Al lanzamiento del satélite soviético Sputnik, en el año de 1957, le siguen una larga lista de misiones tanto civiles como militares, que permitieron a futuro no solo la exploración de nuestro planeta, sino también la de la Luna y los planetas vecinos [1].

Poco después de iniciada la “carrera espacial”, se pone de manifiesto el interés de usar estas plataformas para la adquisición de valiosos datos de la superficie y atmósfera terrestre. En el año de 1969, la NASA pone en órbita el primer satélite de la serie TIROS, pionero en múltiples misiones de observación meteorológica, que permitió el conocimiento y control más ajustado de las condiciones atmosféricas, evitando, o paliando al menos, graves catástrofes naturales [1].

Junto a estos satélites artificiales, también en los años sesenta, se impulsaron misiones tripuladas, dedicadas a la exploración del Sistema Solar y a la tan anhelada conquista de la Luna. Además de la persecución de estos fines, aportaron estas misiones valiosas imágenes sobre la superficie terrestre, que sirvieron de acicate para planear en el futuro proyectos dedicados exclusivamente a esta finalidad. Las primeras fotografías espaciales fueron tomadas por Alan B. Shepard, de forma espontánea y, por qué no decirlo, un tanto rudimentaria, durante una de las misiones del Mercury (1961). Los años siguientes fueron igualmente dedicados a la toma de fotografías desde naves tripuladas, aunque será la misión Gemini-Titán, llevada a cabo en el año de 1965, la que incluya los primeros experimentos formales de fotografía espacial, en este caso, para usos geológicos y meteorológicos (experimentos S005 y S006, respectivamente) [1].

Alentada por los tan buenos resultados obtenidos de estos ensayos, la NASA continúa proyectando en años posteriores este tipo de observaciones. Durante las misiones del Apollo-6 y Apollo-7 se adquieren diversas series de fotografías verticales, mientras en la misión del Apollo-9 (1969) se aborda el primer experimento multispectral, denominado S065, compuesto por cuatro cámaras Hasselblad con distintos filtros [1].

En conjunto, todas estas experiencias, junto al bagaje aportado por los satélites meteorológicos, hacen concebir a la NASA proyectos dedicados exclusivamente a la cartografía y evaluación de los recursos naturales. El siguiente paso se da el 23 de julio de 1972, el cual supone la culminación de esta tendencia, con el lanzamiento del primer satélite de la serie ERTS (Earth Resources Technology Satellite). Este proyecto, bautizado con el nombre de LANDSAT, con la puesta en órbita del segundo satélite, en el año de 1975, resulta el más

fructífero hasta el momento en lo referido a aplicaciones civiles de teledetección. Es a partir de la serie LANDSAT que el interés de la comunidad científica internacional por esta técnica se ve incrementado exponencialmente, contándose por miles los estudios desarrollados –en innumerables países alrededor del mundo– sobre las imágenes proporcionadas por estos satélites [1]

A la serie LANDSAT seguirán otros proyectos específicamente diseñados para la observación medioambiental. Los más conocidos son el laboratorio espacial tripulado Skylab (lanzado en el año de 1973), el satélite oceanográfico Seasat (1978), el de investigación térmica HCMM (1978) – todos estos propiedad de la NASA-, el satélite francés SPOT (1998), el japonés MOS-1 (1987), el indio IRS-I (1988), y los satélites rusos Soyuz y Salut [1].

3.2. Aplicaciones de tipo urbano de la teledetección

La observación de un espacio físico puede darse a través de dos ópticas: desde la perspectiva del ojo humano o a través de la teledetección. La fotografía pancromática es aquella que retrata la visión que el ojo humano es capaz de captar en un instante o momento determinado, mientras que la teledetección amplía su rango de percepción del espectro visible (rango del ojo humano) a otras imágenes que no son asequibles para el ojo del ser humano [2].

Los sensores remotos de tipo satelital están vinculados de manera estrecha a la tecnología de los satélites y la toma de imágenes de tipo digital. Pese al amplio rango de percepción de los sensores remotos, las imágenes generadas por estos pueden ser vistas como en fotografías convencionales. Esto se puede llevar a cabo reproduciendo, ya sea en una pantalla de video o monitor de computadora, las bandas en el espectro visible, siendo esto tal como si se observara una fotografía convencional normal. Sin embargo, si se desean observar imágenes de regiones distintas a las del espectro visible (las cuales son imposibles de ver con el ojo humano), se deben de asignar falsos colores visibles a las bandas correspondientes a dichas regiones del espectro no visible [2].

El principio de teledetección es el siguiente: se inicia a partir de una fuente de energía electromagnética (como por ejemplo, el Sol) la cual emite energía. Esta energía es modificada y alterada por la atmósfera terrestre en distintas formas. Dicha energía incide sobre un objeto, ubicado sobre la superficie terrestre, que interactúa con la energía emitida por la fuente de dos modos: absorbiendo parte de la energía con la que interactúa, y reflejando parte de esta. El sensor entonces, capta la energía reflejada y que ha sido nuevamente modificada por la atmósfera; cuantificándola y grabando las diversas intensidades recibidas en forma de datos numéricos, los cuales son transmitidos a un receptor, donde son procesadas y almacenadas. Es a partir del procesamiento que cada objeto pasa a tener una representación en la imagen, la cual podrá ser analizada para obtener información del área de estudio [2].

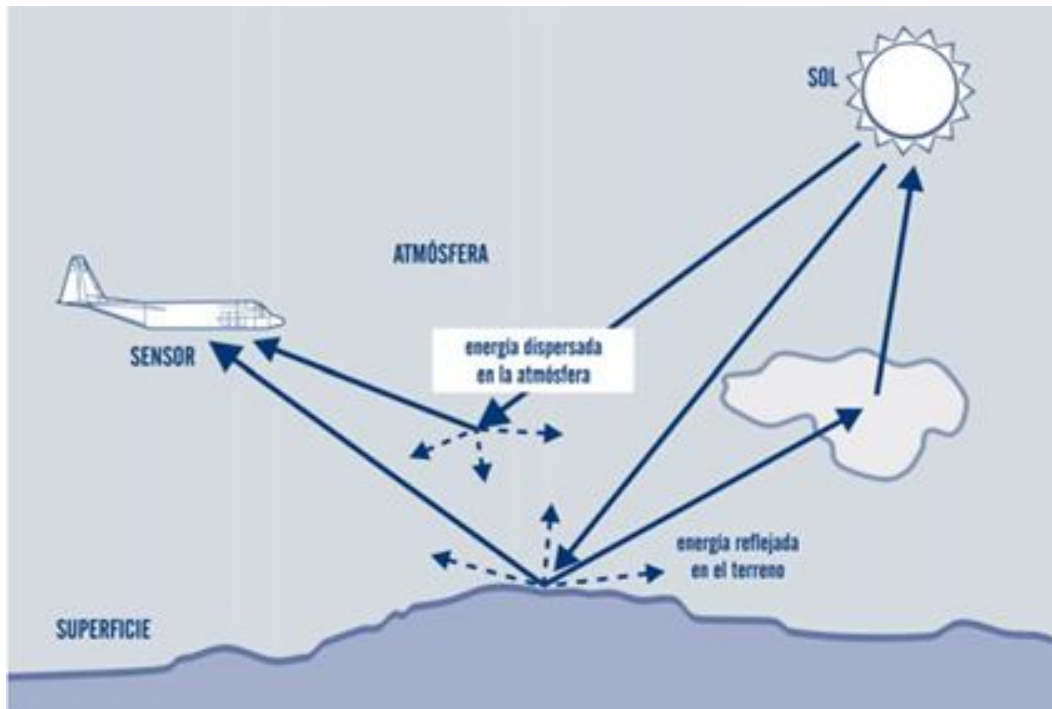


Figura 1: Principio de teledetección.
Fuente: Tomado de Erba (2007) [2].

3.3. Energía electromagnética

Los primeros conocimientos acerca de la luz nacieron de manos de Isaac Newton, el cual expone la teoría corpuscular, la cual es la primera teoría sobre la propagación de la luz. De acuerdo con esta teoría, las fuentes luminosas emiten luz en forma de corpúsculos muy livianos.

La segunda observación acerca de la naturaleza de la luz es la teoría ondulatoria, enunciada por Huygens, la cual expone y afirma que la propagación de la luz es realizada a través de ondas, asemejándose a la manera de la propagación mecánica – acústica-, como la propagación del sonido en el aire. Esta teoría también expone que esta propagación se da en un medio llamado “éter” [2].

En épocas más recientes, y, a partir de los estudios de científicos como Maxwell y Hertz se desarrolla la que hoy día se conoce como la teoría electromagnética, donde se explican algunos de los fenómenos físicos no dilucidados por las teorías anteriores [2].

La teoría de Maxwell, si bien mantiene la idea de un comportamiento ondulatorio, explica además que lo que se propaga es un campo electromagnético en vez de una vibración mecánica sobre el éter [2].

Así pues, los principios tecnológicos geométricos de la teledetección están basados en los principios de la teoría electromagnética y toman la explicación del fenómeno de la propagación de las ondas electromagnéticas de Maxwell [2].

Es así como las ondas de tipo electromagnético constituyen un tipo particular y especial de ondas, producidas por la asociación de dos campos perpendiculares, los cuales son el campo eléctrico y el campo magnético (Figura 2).

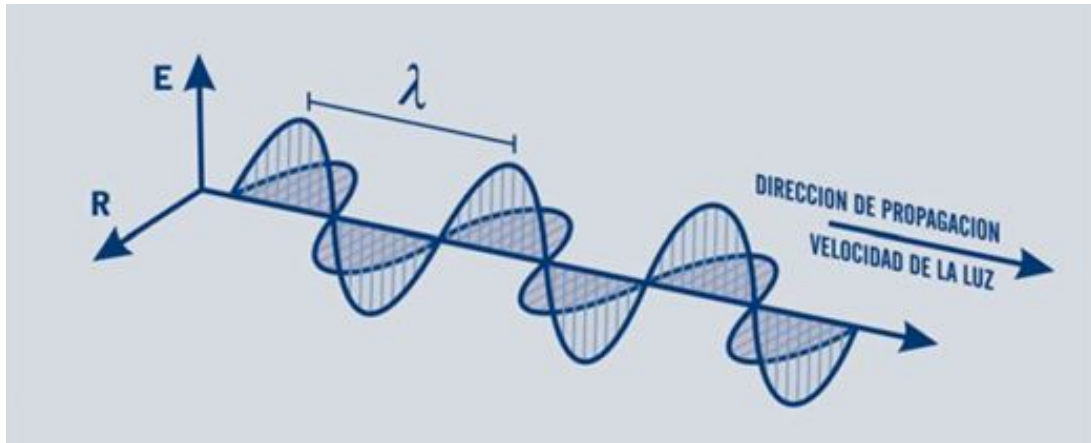


Figura 2: Onda electromagnética
Fuente: Tomado de Erba (2007) [2].

Las ondas electromagnéticas pueden ser modeladas como si fueran ondas sinusoidales, con una longitud definida; siendo su fórmula general:

$$c = \lambda \cdot F \quad (1)$$

donde c = velocidad de la luz en el vacío, que corresponde a 300000 km/s (la cual es constante para todas las ondas electromagnéticas), λ = longitud de onda en metros y F = frecuencia, medida en ciclos por segundo (Hertz) [2].

Se puede deducir, de la anterior expresión, que a mayor longitud de onda, menor frecuencia y viceversa, por lo que basta con tan solo un término para identificar propiamente el tipo de energía mencionado [1].

De acuerdo con la teoría cuántica, es posible calcular la cantidad de energía transportada por un fotón, siempre que se conozca su frecuencia:

$$Q = h \cdot F \quad (2)$$

donde Q es la energía radiante de un fotón (en julios), F la frecuencia y h es la constante de Planck (6.6×10^{-34} J s) [1].

Sustituyendo la primera expresión en esta última, puede determinarse la energía transportada por un fotón en función de la longitud de onda y de la velocidad de la luz:

$$Q = h \left(\frac{c}{\lambda} \right) \quad (3)$$

lo que significa que, a mayor longitud de onda o menor frecuencia, el contenido energético será menor y viceversa. Esto implica que la radiación en longitudes de onda largas es más difícil de detectar que aquella centrada en longitudes cortas, de ahí que las primeras requieran más sofisticados medios de detección [1].

Cabe mencionar que entre las ondas electromagnéticas más conocidas se encuentran la luz visible proveniente del Sol, los rayos X, la luz ultravioleta, las ondas de radio, y las microondas. La diferencia principal entre cada una de estas es la longitud de onda (la cual se concibe como la distancia existente entre dos crestas sucesivas de onda), y por ende, la frecuencia (entendida como el número de longitudes de onda que se produce por unidad de tiempo)[2].

3.3.1. Espectro electromagnético

De acuerdo con lo anterior, se deduce que se puede describir cualquier tipo de energía radiante en función de su longitud de onda o frecuencia. Aunque la sucesión de valores de longitudes de onda es continua, suelen establecerse una serie de bandas en las cuales la radiación electromagnética muestra un comportamiento bastante similar [1].

Al conjunto organizado de esta serie de bandas de longitudes de onda o frecuencia se le conoce como espectro electromagnético (Figura 3). Comprende, de manera continua, desde longitudes muy pequeñas, como las ondas láser, rayos gamma, y rayos X, hasta longitudes muy grandes, (de magnitud de kilómetros) como las ondas de radio [1].

En cuanto a la designación, para las más cortas se utilizan dimensiones de órdenes de magnitud de micras ($\mu\text{m} = 10^{-6}$ metros), mientras que para las longitudes de onda más grandes se utilizan centímetros o metros. A estas últimas, denominadas micro-ondas, se les suelen designar también valores de frecuencia (en gigahercios, $\text{GHz} = 10^3$ Hz) [1].

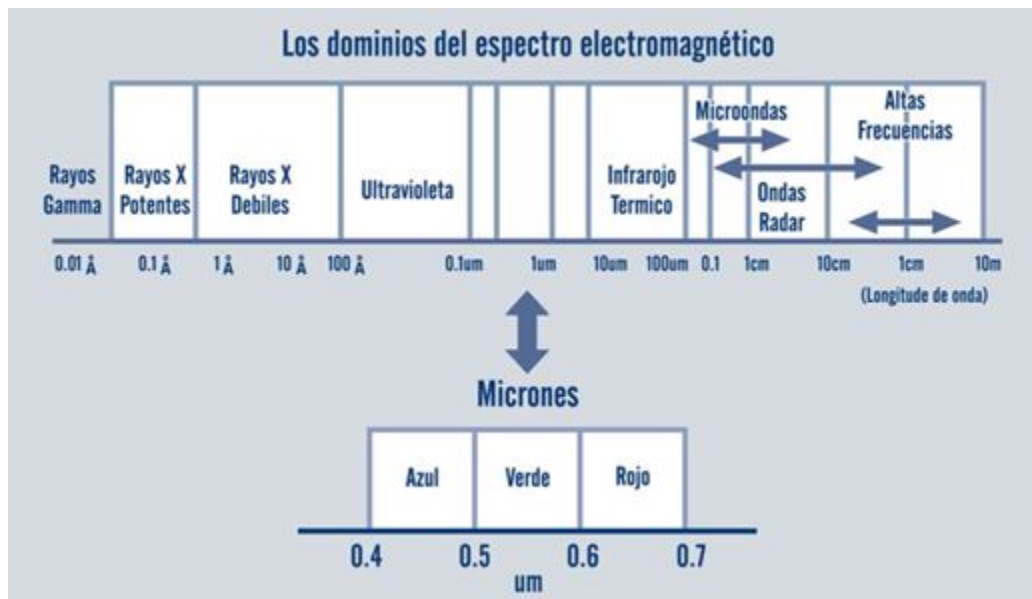


Figura 3: Espectro electromagnético.
Fuente: Tomado de Erba (2007) [2].

Dentro del espectro visible, existen porciones de radiación electromagnética que presentan comportamientos similares, por lo que suelen agruparse. A estas agrupaciones, que presentan comportamiento similar, se les denominan bandas.

Desde el punto de vista de la teledetección, existen una serie de bandas espectrales que son las más frecuentemente utilizadas para tareas de detección, las cuales son las siguientes:

- Espectro visible (0.4 a 0.7 μm). Es denominado de esa manera ya que hace referencia a la única radiación electromagnética que puede ser percibida por los ojos humanos. Es en esta longitud de onda en donde es máxima la radiación solar [1].

Dentro de esta longitud de onda se distinguen tres bandas elementales, las cuales son: Azul: 0.4 – 0.5 μm ; Verde: 0.5 – 0.6 μm ; Rojo: 0.6 – 0.7 μm [1].

- Infrarrojo cercano, próximo o fotográfico (0.7 a 1.2 μm). Es denominado de tal forma ya que puede detectarse a partir de films dotados de emulsiones especiales. Es de gran importancia debido a su capacidad para discriminar masas vegetales y concentraciones de humedad [1].
- Infrarrojo medio (1.3 a 8 μm). En esta banda se entremezclan los procesos de reflexión de la luz solar y emisión de la superficie terrestres [1].
- Infrarrojo lejano o térmico (8 a 14 μm). Es la región del espectro en la que emiten energía todos los cuerpos de la superficie terrestre [3].
- Microondas (mayores a 1 mm). Banda de gran interés por ser un tipo de energía bastante transparente a la cubierta nubosa [1].

3.4. Factores que afectan el comportamiento de la energía electromagnética

La presencia de la atmósfera modifica significativamente el supuesto teórico de la propagación de las ondas electromagnéticas en el vacío, lo que se traduce en una alteración importante y significativa de la calidad de las imágenes.

La atmósfera opera entre la fuente de emisión de ondas y el sensor, como un poderoso filtro en los recorridos de ida y vuelta de la energía electromagnética. Los dos principales efectos que se producen debido a la presencia de la atmósfera son: la dispersión atmosférica y la absorción de la luz.

La dispersión de la radiación electromagnética es causada por la interacción entre esta y las partículas atmosféricas en suspensión, cuya presencia puede llegar a ser constante (oxígeno y dióxido de carbono) o variable (partículas de polvo y gases provenientes de la actividad industrial) [2].

“La absorción de la atmósfera, por su parte, funciona como un filtro que impide la transmisión de las ondas electromagnéticas a ciertas frecuencias” [2].

Este fenómeno es muy importante, ya que tiene como consecuencia la utilización de parte del espectro de ondas emitidas por el Sol. Es por esto que el diseño de los sensores se limita a la observación en las bandas que conforman aquella parte del espectro. Dichas bandas son denominadas “ventanas atmosféricas”, de las cuales se hablará en detalle más adelante [2].

De toda la energía incidente sobre un objeto, se pueden diferenciar tres elementos diferentes: el flujo incidente reflejado, el absorbido y el transmitido. La proporción de estos componentes depende en gran medida de la superficie y la materia de la que se encuentra compuesto el objeto. Además, la proporción de cada uno de estos tipos de flujo incidente está dada en función de la longitud de onda. Esta relación se conoce como firma espectral [2].

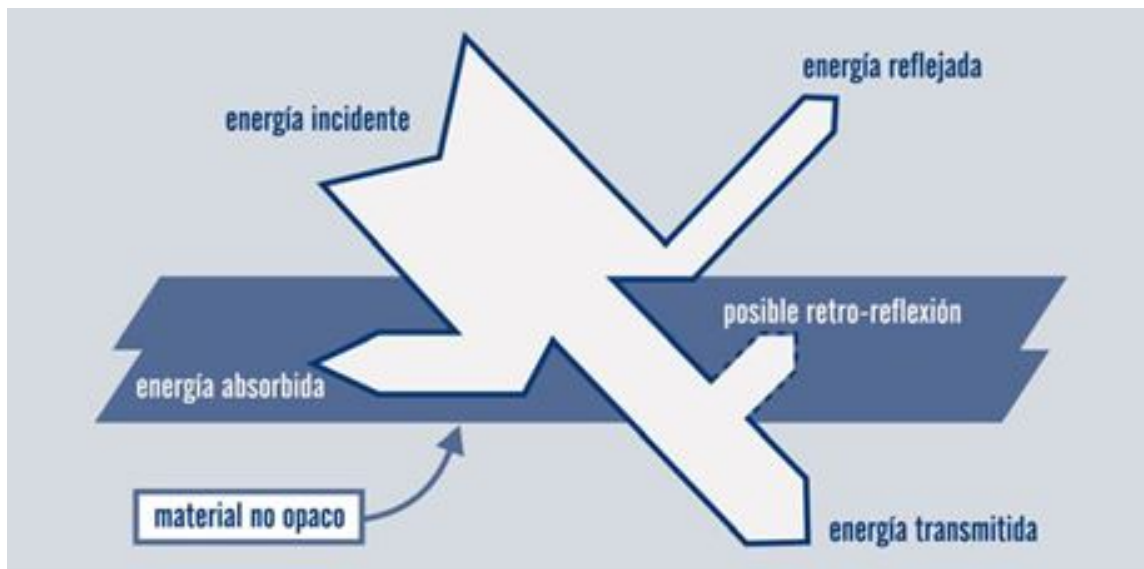


Figura 4: Interacción de la radiación con la materia.

Fuente: Tomado de Erba (2007) [2].

El fundamento o principio detrás de una firma espectral es que los objetos que se encuentran sobre la superficie terrestre se caracterizan por reflejar energía específica, la cual es propia de cada uno de los objetos. Dicha emisión depende de la composición química de los estos y de su estructuración física. La teledetección, entonces, se aprovecha de esta propiedad específica con el fin de lograr identificar a diferentes objetos geográficos [2].

La Figura 5 muestra ejemplos de algunas firmas espectrales. Se muestran las firmas de vegetación, la cual es predominantemente verde al analizarse su reflectancia en el espectro visible y su alta reflectividad en el infrarrojo cercano (que es de gran importancia en el estudio de cultivos). También se muestra la firma espectral del agua, que no refleja el infrarrojo y la firma espectral de los suelos, los cuales son de predominancia rojiza o parda [2].

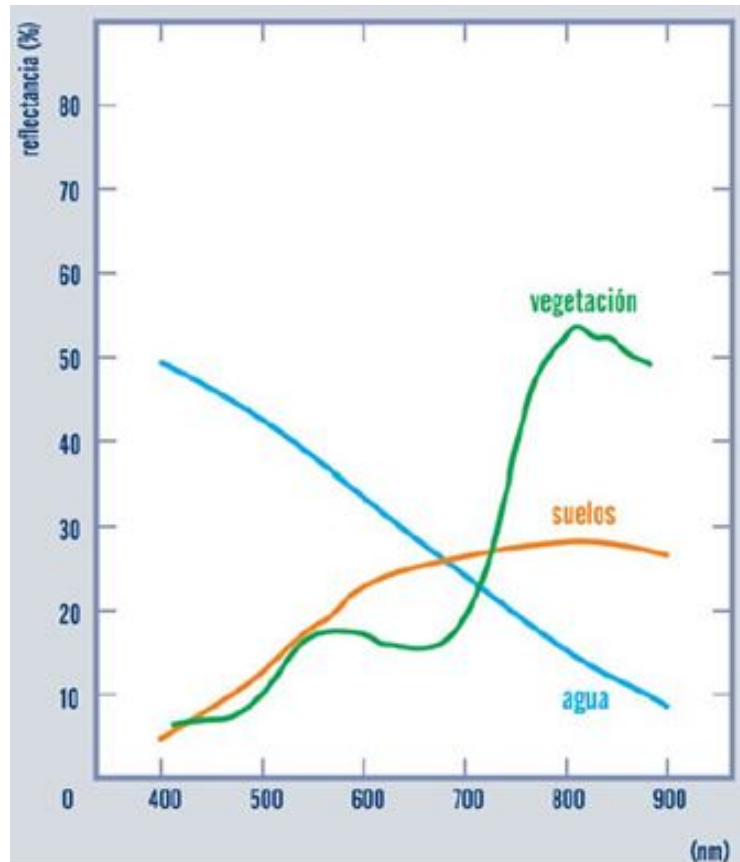


Figura 5: Firmas espectrales.
Fuente: Tomado de Erba (2007) [2].

Pese a todas aquellas ventajas que pueden proporcionar el uso de firmas espectrales, existen algunos inconvenientes en la utilización del concepto de la firma espectral tales como:

- La reflexión producida depende de la forma de estos objetos, del ángulo de toma de la imagen y de la elevación solar. Estos factores pueden ya sea maximizar, o en su defecto, minimizar la calidad de la señal recibida [2].
- La vecindad radiométrica muy estrecha entre algunos objetos geográficos. Este factor puede llevar a firmas espectrales intermedias según la resolución espacial de la imagen [2].
- Los parámetros propios de los satélites durante la toma: la hora y la incidencia del ángulo del emisor de energía (Sol) con la Tierra, según la estación del año, entre otros, están lejos de ser factores marginales y sus grados de incidencia son variables en función de los estudios a realizar [2].

Una de las formas de las que se dispone para resolver este tipo de inconvenientes es la corroboración a campo del valor espectral que se obtiene en la imagen, para contrastar el

lugar con la imagen utilizando como apoyo un receptor GPS, es decir, corroborar en campo que la firma espectral registrada tenga concordancia con la cobertura del lugar, de acuerdo al comportamiento de la primera [2].

3.4.1. Interacciones específicas de la atmósfera con la radiación electromagnética

Como se mencionó anteriormente, la presencia de la atmósfera modifica significativamente el supuesto teórico de la propagación de las ondas electromagnéticas en el vacío, lo que se traduce en una alteración importante y significativa de la calidad de las imágenes [2].

La atmósfera está compuesta de gases –anhídrido carbónico, oxígeno, ozono, nitrógeno y argón, principalmente-, vapor de agua y aerosoles. El anhídrido carbónico, el ozono y el vapor de agua, entre los demás componentes, son los principales responsables de la interacción con la energía electromagnética. El efecto de la acción de estos componentes entre la radiación y la atmósfera puede traducirse en tres fenómenos: (i) absorción de la energía en determinadas bandas del espectro, que se traduce en una limitación de la observación espacial a aquellas bandas en donde la absorción es menos intensa o en ocasiones nula; (ii) dispersión, de determinados flujos, en función de la longitud de onda de estos y por último (iii) emisión, que, como todo cuerpo caliente, tienen su mayor importancia en el infrarrojo térmico. Estos fenómenos, introducen en ocasiones muy severas modificaciones en la radiación originalmente propagada entre la cubierta y el sensor [1].

Absorción atmosférica

La atmósfera opera, entre la fuente de emisión de ondas y el sensor, como un poderoso filtro selectivo a distintas longitudes de onda en los recorridos de ida y vuelta de la energía electromagnética; de tal forma que en algunas bandas del espectro, la posibilidad de observación remota es prácticamente eliminada gracias a la acción de esta [2].

Los principales causantes de esta absorción son:

- Oxígeno atómico (O_2), el cual es un componente que filtra las radiaciones ultravioleta por debajo de valores de $0.1 \mu\text{m}$, así como sectores pequeños en la banda del infrarrojo térmico así como en las microondas [1].
- Ozono (O_3), el cual es el responsable de la eliminación de la energía ultravioleta, inferior a $0.4 \mu\text{m}$, así como la radiación en un sector de las microondas, (alrededor de los 27 mm) [1].
- Vapor de agua, el cual es una fuente importante de absorción en torno a los $6 \mu\text{m}$ y otras bandas menores ubicadas entre 0.6 y $2 \mu\text{m}$ [1].
- Anhídrido carbónico (CO_2), es un componente que absorbe en la región del infrarrojo térmico ($15 \mu\text{m}$), con efectos importantes en el infrarrojo medio, entre las longitudes de onda comprendidas entre 2.5 y $4.5 \mu\text{m}$ [1].

Producto de la absorción generada por los distintos componentes de la atmósfera, la observación espacial es reducida a determinadas bandas del espectro, las cuales son denominadas ventanas atmosféricas, en donde la transmitividad de la atmósfera es suficientemente alta. Las principales ventanas atmosféricas son las siguientes: (i) espectro visible e infrarrojo cercano, ubicado entre 0.3 y 1.35 μm ; (ii) varias bandas en el infrarrojo medio: de 1.5 a 1.8 μm , de 2.0 a 2.4 μm ; de 2.9 a 4.2 μm y de 4.5 a 5.5 μm ; (iii) infrarrojo térmico, entre 8 y 14 μm , y (iv) las microondas, por encima de los 20 mm, en donde la atmósfera presenta un comportamiento prácticamente transparente [1].

Naturalmente, como consecuencia de la reducción de la observación a ciertas bandas, los procesos de teledetección se centran en las ventanas atmosféricas antes mencionadas, y por ende, el diseño de los sensores espaciales va dirigido a dichas bandas, con lo que se evitan interferencias perjudiciales al fenómeno de observación [1].

Es por ello que no resulta muy habitual encontrar este problema en la interpretación de imágenes, salvo, claro, en el caso de la presencia de coberturas nubosas, normalmente evitables gracias a la selección adecuada de imágenes [1].

Como la observación remota no se centra únicamente en el estudio de fenómenos en la superficie terrestre, también pueden darse observaciones dirigidas al estudio de la atmósfera misma. Cuando esto sucede, los sectores espectrales más convenientes son, precisamente, aquellos en donde la absorción atmosférica es alta, razón por la cual los satélites meteorológicos incorporan bandas en estas regiones del espectro. Como ejemplo, puede mencionarse la banda 2 del satélite Meteosat, comprendida entre 5.7 y 7.1 μm , el cual fue diseñado para el estudio del vapor de agua de la atmósfera [1].

Dispersión atmosférica

La dispersión de la radiación electromagnética es causada, como se mencionó anteriormente por la interacción entre esta y los gases y partículas en suspensión. Ahora bien, la reflexión consiguiente a este choque supone un aporte adicional a la radiancia proveniente de la superficie terrestre (luz atmosférica). Debido a la variabilidad tanto en tiempo como en el espacio de las partículas atmosféricas, es muy complejo cuantificar la influencia final de estas en las imágenes adquiridas por un sensor. Es conveniente, entonces tener en cuenta este factor, en particular cuando se pretenden convertir valores digitales de la imagen a parámetros físicos, o bien se aborden estudios multitemporales [1].

La dispersión Rayleigh afecta a longitudes de onda cortas. Es el tipo de dispersión más conocida y la de mayor influencia en teledetección, causante, entre muchas cosas, del color azul del cielo [1].

Al abordar lo relacionado a la dispersión atmosférica, se hace necesario hablar de componentes de la atmósfera como aerosoles y el vapor de agua, los cuales son los principales causantes del fenómeno de dispersión atmosférica [1].

En el caso particular de los aerosoles, estos pueden ser de origen muy diverso, desde origen oceánico, (debido al movimiento de las aguas) o continental, polvo en suspensión o partículas emitidas por combustión. En función de su origen y de las características propias,

poseen muy variados tamaños por lo que se pueden diferenciar distintos tipos de dispersión, ya que esta es muy dependiente del diámetro de las partículas. Es de esta forma que se habla de dispersión Rayleigh cuando las longitudes de onda más afectadas son las longitudes inferiores al diámetro de la partícula; dispersión Mie cuando el diámetro de las partículas y la/las longitudes de onda son muy similares, y dispersión no selectiva cuando se mencionan las partículas de mayor tamaño [1].

Abordando de manera más detallada, la dispersión Mie es también dependiente de la longitud de onda, si bien en menor grado que la Rayleigh. Aerosoles y polvo atmosférico son los principales responsables de este tipo de dispersión, aunque puede presentarse en incendios forestales o en bruma costeras [1].

En cuanto a la dispersión no selectiva, esta afecta indiscriminadamente a diversas longitudes de onda. Por consiguiente, las nubes o niebla tienden a aparecer blancas, ya que dispersan por igual toda luz visible [1].

Emisión atmosférica

Junto a los fenómenos de dispersión y absorción atmosférica, también se encuentra el de la emisión atmosférica. Como todo cuerpo por encima del cero absoluto, la atmósfera emite su propia energía calorífica, por lo que es un aspecto a considerar al momento de estimar las emitancias espectrales que originalmente provienen del suelo [1].

El efecto de emisión atmosférica es fundamental en el trabajo dentro del infrarrojo térmico, cuando se desean realizar mediciones de temperatura a partir de imágenes espaciales [1].

3.4.2. Características de las principales cubiertas en el espectro óptico

Características de la vegetación en el espectro óptico

La caracterización de las masas vegetales es una de las tareas, dentro del campo de la teledetección más importantes e interesantes de realizar. Pese a la gran importancia que ofrece la identificación de las masas vegetales, aún se encuentran notables dificultades para su realización producto de los múltiples factores que influyen en la radiancia final detectada por el sensor. En primera instancia, la propia reflectividad de la hoja es un factor muy importante a considerar, que a su vez está en función de otros factores tales como la forma, el estado fenológico y el contenido de humedad en esta. Además de esto, también es indispensable tomar en cuenta características esta vez de tipo morfológico de la planta, tales como su altura, perfil, grado de cobertura del suelo, por mencionar algunas, que desembocan en modificaciones importantes de su comportamiento reflectivo. Un tercer grupo de factores que influyen de manera importante en el estudio de las masas vegetales a través de teledetección es el relacionado a las características y situación geográfica de la planta, las cuales hacen referencia a aspectos como la pendiente, orientación, geometría de la cobertura de suelo, y la asociación con otras especies, entre muchas otras [1].

Sin embargo, pese a la innumerable cantidad de factores que afectan y tienen una im-

portante influencia en el estudio de la vegetación, se suele discriminar el estudio hacia el comportamiento espectral de la vegetación vigorosa [1].

Estudios teóricos en esta materia han mostrado que el comportamiento típico de la vegetación muestra una reducida reflectividad en las bandas visibles, con un máximo relativo en la porción verde del espectro (en torno a $0.55 \mu\text{m}$). En contraparte, en el infrarrojo cercano la vegetación presenta una elevada reflectividad, la cual va disminuyendo de manera progresiva hacia el infrarrojo medio [1].

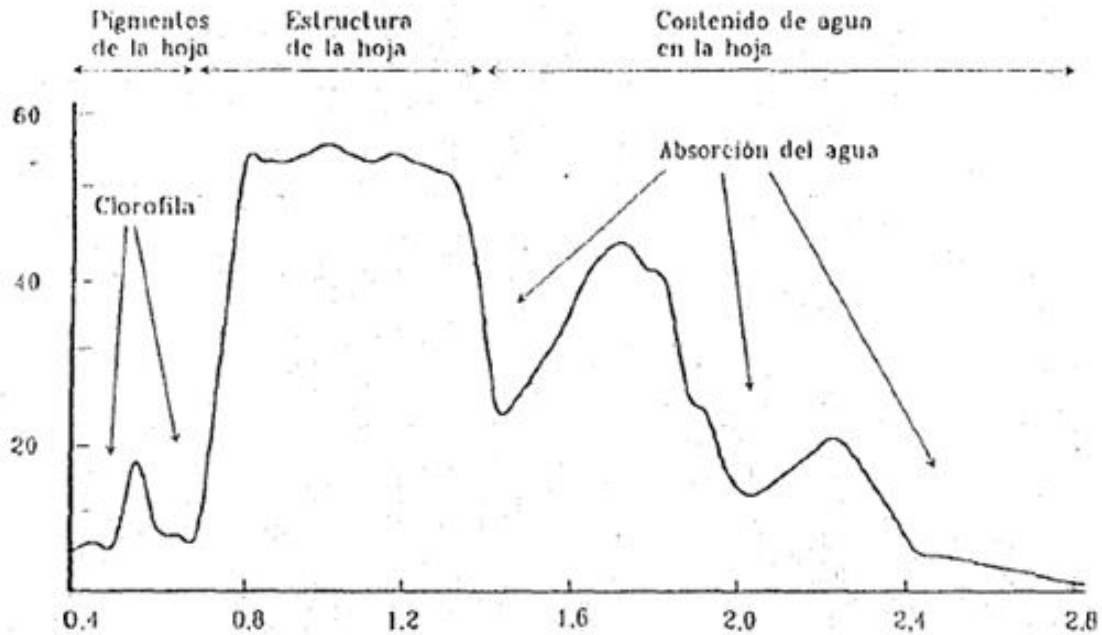


Figura 6: Firma espectral de la vegetación sana.
Fuente: Tomado de Chuvieco (1995) [1].

Tales características en el comportamiento en la vegetación se encuentran íntimamente relacionadas con la acción de los pigmentos fotosintéticos así como la del agua almacenada en las hojas. De manera concreta, la baja reflectividad en la porción visible del espectro es debido al efecto absorbente de los pigmentos presentes en la hoja, principalmente las clorofilas, xantofilas y carotenos. Todos estos componentes absorben en la banda del espectro situada en torno de los $0.445 \mu\text{m}$, mientras que la clorofila presenta una segunda banda de absorción en torno de los $0.645 \mu\text{m}$. Entre ambas porciones del espectro aparece una banda intermedia, de alrededor de los $0.55 \mu\text{m}$, en donde el efecto absorbente es menor [1].

Debido a esto, aparece un pico relativo de reflectividad que coincide con la banda verde del espectro visible, y causa el color con el que los ojos humanos perciben la vegetación vigorosa [1].

La influencia de la clorofila es mucho menos significativa cuando las hojas están próximas a la caída otoñal, justificándose de esa manera la mayor reflectividad en la banda roja y, en definitiva, su color amarillento (verde + rojo). Es en algunas especies en donde otro pigmento, la antocianina, destaca en su acción e influencia, ya que es un buen reflector de la porción roja del espectro, causante de ese color en las épocas de senescencia [1].

Con respecto a la elevada reflectividad en el infrarrojo térmico cercano, esta parece ser debida a la estructura celular interna de la hoja. Concretamente a la capa esponjosa del mesófilo, con sus cavidades de aire internas, ejerciendo un papel principal al difundir y dispersar la mayor parte de la radiación incidente en esta banda del espectro. Es por esto que una hoja sana ofrece una alta reflectividad en el infrarrojo cercano (entre 0.7 y 1.3 μm), en un claro contraste con la baja reflectividad que ofrece en el espectro visible, en especial en la banda roja. Dado que la estructura de la hoja es muy variada de acuerdo a la especie, esta banda también puede ser utilizada para la discriminación de plantas, incluso aquellas que no podrían separarse en el espectro visible [1].

Es a partir de alrededor de 1.4 μm que la reflectividad de la vegetación se reduce de manera drástica en el infrarrojo medio debido al efecto absorbente del agua. De acuerdo con experimentos de laboratorio, una hoja seca puede alcanzar hasta cuatro veces el valor de una hoja húmeda para la banda ubicada en torno a 1.9 μm [1].

En resumen, el contraste más nítido en la reflectividad espectral de la vegetación sana se produce entre las bandas visibles, principalmente el rojo (en torno a 0.645 μm) y el infrarrojo cercano (0.7 a 1.3 μm). Dado este comportamiento, se suele enunciar un principio genérico en torno a la vegetación, y es que cuanto mayor sea el contraste entre ambas bandas, mayor será el vigor de la vegetación, y por ende una mayor claridad de discriminación frente a otros tipos de cubiertas [1].

Características del suelo en el espectro óptico

En el caso particular del suelo, contrario a lo que pudiera pensarse, tampoco resulta fácil la obtención de información de los sustratos geológicos a partir de sensores espaciales. Una de las muchas causas de la dificultad para la obtención de información del suelo es el efecto pantalla provocado por la cubierta vegetal de la zona de estudio. Sin embargo, son las mismas anomalías en la cubierta vegetal las que posibilitan la obtención de algunos datos indirectos acerca de las características del suelo de la zona [1].

Dichas anomalías pueden consistir en distribuciones particulares de la vegetación, un crecimiento o densidad irregular, alteraciones de la pigmentación o del ciclo fenológico. Si bien estos fenómenos pueden ser adjudicados todos al sustrato geológico, existe una relación estrecha entre aquellos y el suelo, por lo que puede obtenerse información valiosa a partir de la vegetación [1].

En cuanto a los suelos desnudos, su comportamiento espectral es mucho más uniforme que el de la vegetación, mostrando una curva espectral mayormente plana y de naturaleza ascendente. Los factores más importantes vinculados a este comportamiento son la composición química de estos, su textura, estructura y contenido de humedad [1].

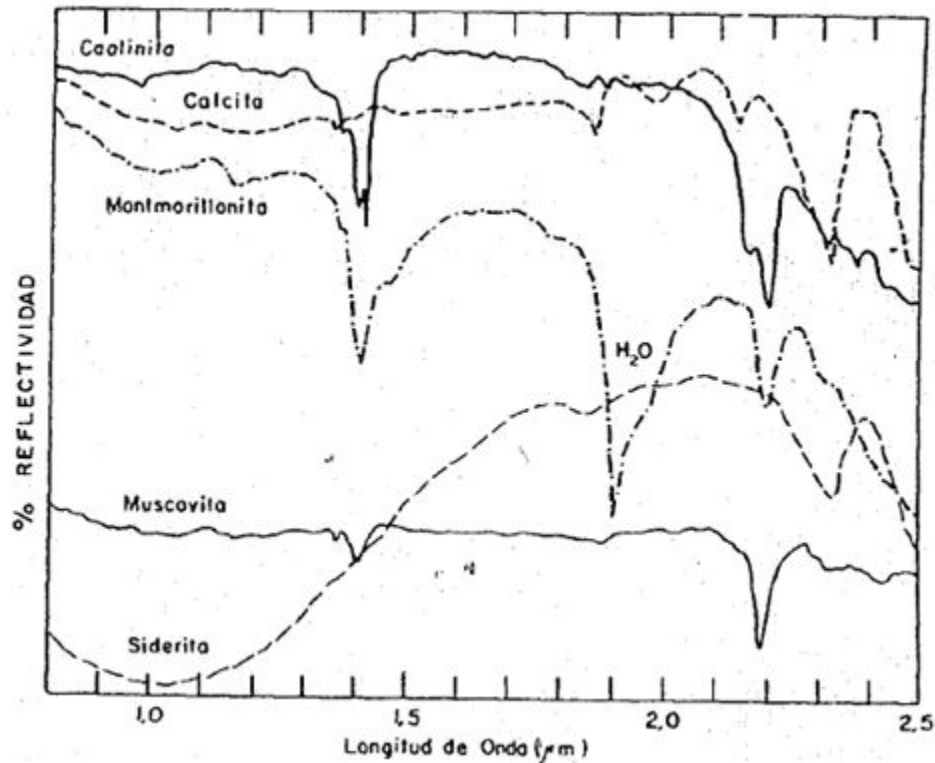


Figura 7: Espectros de laboratorio para distintos minerales.
Fuente: Tomado de Chuvieco (1995) [1].

Características del agua en el espectro óptico

En lo referido al agua, las superficies acuáticas absorben o transmiten la mayor parte de la radiación visible que reciben, siendo mayor su absorptividad cuanto mayor sea la longitud de onda. La curva espectral es, por lo tanto, muy similar a la del suelo, con la diferencia que presenta un sentido contrario. La mayor reflectividad del agua clara se produce en el azul, reduciéndose paulatinamente hacia el infrarrojo cercano, donde esta es prácticamente nula. Es por esto que la frontera tierra-agua es sumamente nítida en esta banda [1].

La variabilidad del agua es más detectable en longitudes de onda más cortas, como el azul y verde, que se relacionan estrechamente con su profundidad, contenido de materiales en suspensión (clorofila, arcillas y nutrientes), y rugosidad de superficie [1].

El papel de la profundidad en la detección de agua es fundamental ya que tiene influencia directa en el aporte de reflectividad producto de los materiales de los fondos. La reflectividad aumenta en aguas poco profundas, por lo que se produce un aporte de las características espectrales de los fondos. Como consecuencia de esto, la absorción será mayor cuanto más profunda sea la capa de agua [1].

Otro de los aspectos de la detección de agua que pueden estudiarse es la presencia de clorofila en esta. De existir grandes concentraciones de clorofila en cuerpos de agua, la reflectividad en el azul tiende a descender, en contraposición con el aumento en el verde.

Este comportamiento permite inferir una clara correlación, de carácter negativo, entre la reflectividad del agua en la banda y azul y el contenido de clorofila, por lo que se facilita en gran manera la localización de concentraciones de algas, o bien sea el estudio de la eutrofización de embalses, como otra de sus aplicaciones [1].

3.5. Sensores remotos

Se denomina satélite a todo cuerpo que gira con una órbita determinada alrededor de un cuerpo con una masa mucho mayor, y que no necesita de motor o impulsión propia, movilizado únicamente por las leyes de la gravitación [2].

Existen dos tipos de satélites: los naturales y los artificiales. Los naturales son aquellos cuerpos celestes como la Luna, que gira alrededor de la Tierra, mientras que los artificiales son aquellos que son obra del hombre, los cuales pueden tener diferentes finalidades, como lo son la comunicación, localización y navegación (satélites GPS), estudios científicos, o la observación de la Tierra [2].

En los satélites de observación, la altura de la órbita define el área de la cual se es posible realizar el levantamiento, que se encuentra, por lo general, entre los 700 y 1000 kilómetros de altitud. En cuanto al tiempo y velocidad para realizar una órbita, son otras de las características importantes para un satélite. La duración define la capacidad del satélite de volver a ubicarse sobre el mismo punto del terreno (re-visita). Otra importante característica es la posición de órbita, la cual es entendida como la inclinación sobre el plano del Ecuador, con respecto a la Tierra [2].

También existen los satélites geoestacionarios. Estos son aquellos cuyas órbitas se encuentran en el plano del Ecuador y que mantienen la misma velocidad de rotación de la Tierra, encontrándose a alturas aproximadas de los 36000 km. Son de baja resolución, sin embargo, tienen la ventaja de poder ver una gran área del planeta. Son ideales para finalidades como comunicaciones y para fines meteorológicos [2].

3.6. Sensores activos y pasivos

Los sensores remotos suelen clasificarse en dos grupos: activos y pasivos. Dicha clasificación se basa en la consideración del origen del emisor de la energía.

- Los sensores activos (Figura 8-a) son aquellos que son capaces de emitir un haz de energía que luego recogen tras su reflexión sobre la superficie de los objetos a los cuales pretenden observar. En este grupo, el equipo más común es el RADAR, el cual trabaja en la banda de las microondas, y cuya importancia se encuentra en que no es afectado por las condiciones climáticas [2].
- Los sensores pasivos (Figura 8-b) son aquellos que únicamente se limitan a recoger la energía electromagnética proveniente de los objetos, pudiendo ser que dicha energía

sea el reflejo de los rayos solares, o en virtud de la temperatura de los objetos. Este grupo se subdivide en dos grupos más a saber:

- Sensores de barrido (scanners): son aquellos donde un espejo móvil permite explorar una franja del terreno a ambos lados de la traza del satélite. La radiancia recibida por este componente óptico es dirigida a una serie de detectores que amplifican y la convierte en una señal digital [2].
- Sensores de empuje (pushbroom): son aquellos en los que se elimina el espejo oscilante, al disponer de una cadena de detectores que cubre todo el campo de visión del sensor [2].

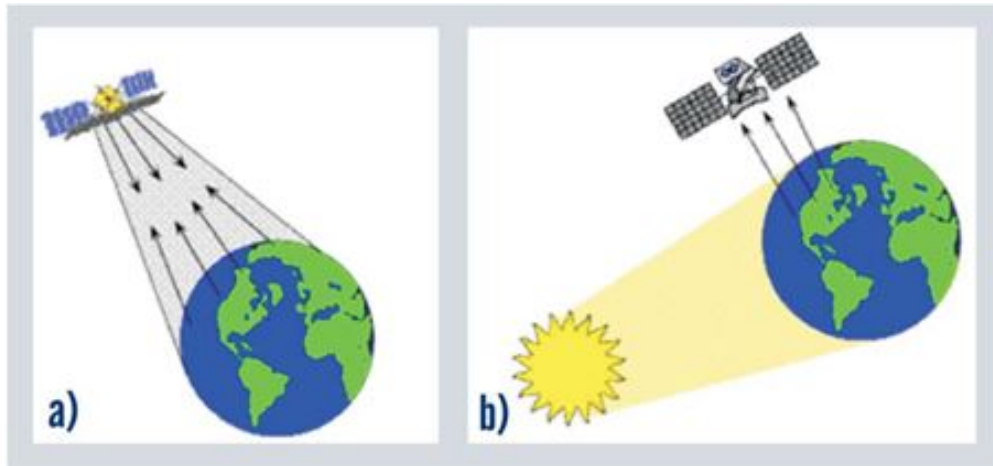


Figura 8: Sensores activos y pasivos.
Fuente: Tomado de Erba (2007) [2].

3.7. Plataformas de teledetección espacial

Es entendida como plataforma de teledetección a los satélites (LANDSAT, METEOSAT, NOAA, SPOT) o aviones que transportan a los aparatos necesarios para captar, almacenar y/o transmitir imágenes a distancia [4].

Dependiendo de su distancia al suelo, se pueden distinguir diferentes tipos de plataformas, las cuales pueden diferenciarse de la siguiente manera:

- Nivel de suelo o a pocos metros de altura: grúas, vehículos que transportan radiómetros o aparatos fotográficos.
- Entre diez (10 m) metros y diez (10 km) kilómetros de altitud: aviones, helicópteros, y globos aerostáticos.
- Entre diez (10 km) y cien (100 km) kilómetros de altitud: globos estratosféricos.
- Entre doscientos (200 km) y cuatrocientos kilómetros (400 km) de altitud: satélites habitados, como la Estación Espacial Internacional y satélites automáticos de teledetección [4].

En el caso de aviones como plataformas de teledetección, estos presentan ventajas e inconvenientes. Entre las ventajas que se pueden mencionar destacan la posibilidad de embarcar en el avión dispositivos de mayor peso que en un satélite; también el control más preciso de los captadores en vuelo y la obtención de datos de mejor resolución espacial [4].

Entre las limitaciones, de las más importantes que pueden mencionarse son las reducidas dimensiones de la zona de exploración, así como el elevado coste de obtención de los datos en comparación con los satélites [4].

En el caso de un captador o sensor, estos son sistemas tecnológicos preparados para captar imágenes a distancia y que son transportados en una plataforma. Son capaces de captar información para diferentes regiones del espectro, y a cada una de estas regiones se les denomina canal o banda [4].

Como ejemplo, la plataforma LANDSAT es una plataforma que contienen dos sensores “*Thematic Mapper*” (TM) y *Multispectral Scanner* (MSS). En el caso del TM, puede captar radiación en siete (7) bandas (azul, verde, rojo, tres en infrarrojo cercano y uno en infrarrojo térmico). MSS, por su parte, dispone de cuatro bandas (verde, rojo, y dos en infrarrojo cercano) [4].

3.7.1. Programa LANDSAT

Es hasta hoy día el proyecto más fructífero de teledetección espacial desarrollado. El programa LANDSAT es una familia de satélites, lanzados entre los años de 1972 y 1975.

La buena resolución de sus sensores, así como el carácter global y periódico de la observación que realizan y su muy buena comercialización son solo unas de las muchas razones que explican su difundido empleo por expertos de muy variados campos en todo el mundo. Como dato interesante, es preciso mencionar que solo hasta 1980, la cobertura territorial proporcionada por los diversos satélites de la serie LANDSAT se cuantificaba en unos 32,000 millones de km², traduciéndose en unas 385,000 imágenes adquiridas por estaciones estadounidenses, y en 560,000 las imágenes adquiridas por estaciones foráneas (de países como Brasil, Canadá, China, Italia, Suecia, Irán, Japón, India, Argentina, Sudáfrica y Australia). Estos datos, por si solos bastan para valorar la importancia de este proyecto espacial en el campo de la teledetección [1].

3.7.2. El satélite SPOT

El proyecto SPOT (*Système Probatoire d’Observation de la Terre*), desarrollado por el CNES francés en colaboración con Bélgica y Suecia, es, frente al estándar marcado por el programa LANDSAT, uno de los proyectos de teledetección espacial más novedoso. Se encuentra compuesto por dos satélites, siendo lanzado el primero en el año de 1986, mientras que el segundo fue puesto en órbita a inicios del año 1990 [1].

Entre las novedades introducidas por este satélite, se encuentra la incorporación de dos equipos de exploración por empuje denominados HRV (*Haute Resolution Visible*). Estos dos sensores permiten obtener imágenes en dos modalidades pancromáticas y multibanda (verde,

rojo e infrarrojo cercano), con una resolución espacial de 10 y 20 m, respectivamente [1].

El área cubierta en cada escena es de 60 km de lado, por lo que estos sensores necesitan incorporar 3,000 detectores en modo multibanda multispectral y 6,000 en modo pancromático. La resolución radiométrica por pixel se cifra en 8 bits en multibanda y 6 en pancromático [1].

Cuadro 1: Características del sensor HRV – SPOT.

Banda	Amplitud	Resolución
XS1	0.50 - 0.59 μm	20 metros
XS2	0.61 - 0.68 μm	20 metros
XS3	0.79 - 0.89 μm	20 metros
P	0.51 - 0.73 μm	10 metros

Nota: Tomado de Gutiérrez (2016) [4].

Otra de las novedades incluidas en el satélite SPOT es su capacidad para variar el ángulo de observación, gracias a un dispositivo móvil instalado en el equipo óptico. Esto le permite observar la misma zona en órbitas sucesivas, reduciendo la frecuencia temporal de las imágenes (de 26 días a 2-3 días según las latitudes). Esa misma aptitud permite al SPOT adquirir imágenes estereoscópicas, lo que le añade a su potencial temático una clara capacidad topográfica. Esta flexibilidad del sistema le facilita adaptar su órbita a las necesidades del usuario [1].

En lo referido a las aplicaciones, la mejora en la resolución espacial frente al sensor TM hace a las imágenes SPOT adecuadas para aplicaciones especialmente en el medio urbano. De igual forma se han desarrollado técnicas para combinar el canal pancromático de SPOT con imágenes TM de tal forma que se aprovecha la resolución de este último, recogiendo de alguna forma la resolución espacial del primero [1].

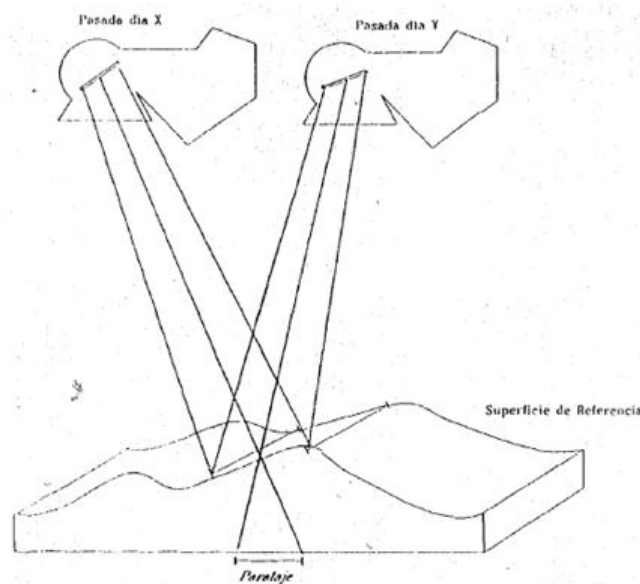


Figura 9: Sistema de adquisición de imágenes estereoscópicas que realiza el satélite SPOT.

Fuente: Tomado de Chuvieco (1995) [1].

3.7.3. Tiros - NOAA

Es una familia de satélites que conforma uno de los múltiples programas diseñados para el envío de información meteorológica a la superficie terrestre. Los satélites meteorológicos, los cuales son los únicos que pueden calificarse como plenamente operativos hasta el momento, se desarrollaron a partir del año 1960 con el lanzamiento del primero de estos satélites, TIROS-1. Como continuación de esta serie de satélites, se tienen a la denominada NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration Satellite*), nombrada de esta forma a partir del sexto satélite, que fue lanzado en el año de 1979 [1].

Considerando que el principal objetivo de este programa es la facilitación de información sobre el estado presente de la atmósfera, el satélite NOAA fue diseñado para ofrecer un ciclo de cobertura de período corto: una imagen cada doce horas, en nuestras latitudes. Este ciclo es mejorado a seis horas gracias a la sincronización entre los dos satélites que operan simultáneamente. Su altura orbital es de ochocientos treinta y tres a ochocientos setenta kilómetros, los cuales cubren en una sola imagen un área equivalente aproximada de tres mil kilómetros de lado [1].

3.8. Resoluciones de un sistema sensor

Todos los sensores tienen asociados a ellos una resolución, la cual es entendida como la capacidad de registrar, discriminando información en detalle. Cabe destacar que la resolución de un sensor depende del efecto combinado de todas sus partes. El concepto de resolución implica cinco tipos de distintas manifestaciones:

3.8.1. Resolución espacial

Designa al objeto más pequeño que puede distinguirse sobre una imagen, que se denomina píxel (proyección del detector individual sobre la superficie terrestre). Define el tamaño del píxel, que es la distancia correspondiente al tamaño de la mínima unidad de información contenida en la imagen [3].

La resolución espacial de un sensor óptico-electrónico depende de diversos factores tales como la altura orbital, velocidad de exploración y el número de detectores. En cuanto a los sensores de antena, su resolución depende del radio de apertura, altura de la plataforma y la longitud de onda a la que se trabaje. A mayor radio de apertura, menor altitud y menor longitud de onda la resolución aumenta, por lo que se hace más detallada la información [3]. Tiene un papel muy importante en la interpretación de la imagen ya que marca el nivel de detalle que ofrece [2].

3.8.2. Resolución espectral

La resolución espectral se refiere al número y ancho de las bandas espectrales que contienen el sensor. A mayor número de bandas proporcionadas por un sensor, mayor es la

capacidad de este de discriminar más diversidad de objetos. En este sentido, se prefiere una estrechez alta entre bandas, con el objeto de recoger señales sobre regiones coherentes del espectro [3].

Es de esa cuenta que la resolución espectral define la cantidad de bandas espectrales que componen una imagen. Las imágenes LANDSAT 7, son imágenes multiespectrales de 8 bandas, 3 en el espectro visible, y 4 en el infrarrojo y una pancromática [3].

3.8.3. Resolución radiométrica

La resolución radiométrica se refiere a la sensibilidad del sensor, es decir, su capacidad para detectar variaciones en la radiancia espectral que recibe. “La resolución radiométrica del sensor se indica por el número de niveles de gris. En la actualidad, la mayor parte de los sistemas ofrecen alrededor de 256 niveles por píxel, 8 bits” [3].

3.8.4. Resolución temporal

La resolución temporal indica cual es la frecuencia de revisita del satélite, es decir, cuanto tiempo debe pasar para que el satélite pueda obtener una nueva imagen sobre un área particular. El ciclo de cobertura se encuentra en función de las características orbitales de la plataforma (altura, inclinación, velocidad), así como del propio diseño del sensor [3].

Esta periodicidad de adquisición de imágenes de la superficie terrestre también puede estar en función de los objetivos fijados para cada sensor de acuerdo a cada sistema espacial. Por ejemplo, el satélite LANDSAT puede ver la misma área de la Tierra cada 16 días [3].

3.8.5. Resolución angular

Esta resolución está referida a la capacidad de un sensor para observar la misma zona desde distintos ángulos. Este tipo de resolución (observación multiangular) puede llegar a resultar de gran interés para fines como estimar algunas variables atmosféricas, ya que al variar el ángulo de mira se observa la superficie terrestre con un espesor atmosférico diferente, con lo que también varían, en consecuencia, los procesos de absorción y dispersión [3].

Las resoluciones de algunos satélites importantes se muestran a continuación en la siguiente figura.

Satélite	Sensor	Resolución Espacial	Resolución Espectral	Resolución Temporal
LANDSAT	MSS	80 m	4 bandas	16 días
	TM	30m	7 bandas	16 días
SPOT	XS	20m	3 bandas	26 días
	P	10m	1 banda	26 días
NOAA	AVHRR	1.1 Km.	5 bandas	12 horas
		4 Km.	2 bandas	12 horas
Ikonos	P, MSS	1 m	4 bandas	2 días
QuickBird	P, MSS	0,61 m	4 Bandas	

Figura 10: Resoluciones de diferentes satélites y sensores remotos.
Fuente: Tomado de Erba (2007) [2].

3.9. Imágenes satelitales

Una imagen satelital, en principio, es una imagen digital, la cual se caracteriza por ser una composición de más de una imagen, cada una de las cuales corresponde a una banda espectral (Figura 11). Es por esta razón que se dice que una imagen satelital presenta una tercera dimensión: las bandas espectrales [2].

Una imagen digital se encuentra compuesta por los siguientes elementos:

- **Píxel:** unidad mínima de información en una imagen digital, definida por un número ND (nivel digital) [5].
- **Nivel digital (ND):** valor digital que puede traducirse a una intensidad visual (nivel de gris), mediante cualquier convertidor digital-analógico [5].

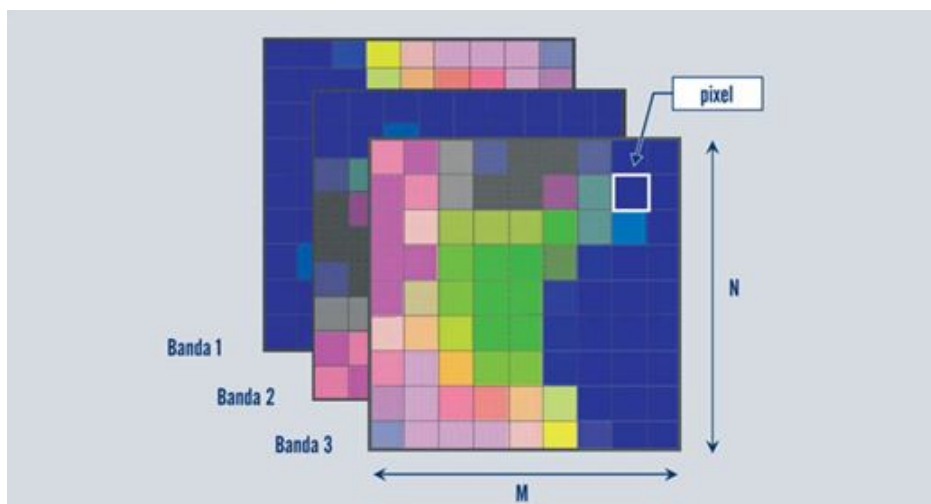


Figura 11: Estructura de las imágenes satelitales.
Fuente: Tomado de Erba (2007) [2].

Para calcular el espacio en disco que ocupará una imagen ráster convencional, se puede utilizar la siguiente fórmula:

$$T = (x \cdot y \cdot b) \cdot n \cdot 1.2 \quad (4)$$

donde: y = número de filas, x = número de columnas, n = número de bandas, b = número de bytes por píxel, y T = es el tamaño del archivo de salida. Dado que el número de bites por píxel es: 0.5 (para datos de 4 bit), 1 (para datos de 8 bit) y 2 (para datos de 16 bit) [2].

El último dato, el factor 1.2 agrega un 10% al tamaño del archivo, por capas piramidales (permiten una visualización en pantalla más rápida de la imagen) y otro 10% para misceláneos como histogramas, tablas de especificaciones internas, entre otros [2].

Los formatos en los que originalmente pueden ser guardadas las imágenes son tres a saber:

- BIL (*band interleaved by line*), donde cada grabación en el archivo contiene una línea de escala (fila) de datos para una banda. Así, todas las bandas de datos para una determinada línea van siendo guardadas en forma consecutiva en un archivo [2].
- BSQ (*band sequential*), donde la totalidad de cada banda es guardada en forma consecutiva de la misma fila. Este formato tiene como ventaja que cada banda puede ser leída y vista fácilmente y múltiples bandas pueden ser abiertas en cualquier orden [2].
- BIP (*band interleaved by pixel*), donde el valor de cada banda está enlazado a un determinado píxel [2].

3.10. Teledetección e imágenes LANDSAT

La constelación de satélites LANDSAT (Land = tierra, SAT= satélite), que inicialmente fueron llamados ERTS (*Earth Resources Technology Satellites*), se constituye como la primera misión de los Estados Unidos para el monitoreo de los recursos terrestres. La conforman 8 satélites de los cuales solo se encuentran hoy día activos el 5 y el 8. Su mantenimiento y operación están a cargo de la NASA, en tanto que la producción y comercialización de las imágenes dependen del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS) [4].

Los satélites LANDSAT llevan a bordo diferentes instrumentos. La evolución de estos satélites buscó siempre la captación de información de la superficie terrestre, con mayor precisión y detalle. De ahí se derivan las mejoras radiométricas, geométricas y espaciales introducidas e incorporadas a los sensores pasivos; el primero, conocido como Multispectral Scanner Sensor (MSS), seguido de Thematic Mapper (TM) que tiene una mayor sensibilidad radiométrica que su antecesor. Le sigue el Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+) que entre sus mejoras técnicas se destacan una banda espectral (pancromática) con resolución de quince metros (15 m) y por último un satélite que cuenta con dos sensores: el primero de ellos denominado Operational Land Imager (OLI) y el sensor térmico infrarrojo Thermal

Infrared Sensor (TIRS). Los sensores OLI y TIRS recogen los datos de forma conjunta para proporcionar imágenes coincidentes de la superficie terrestre, incluyendo hasta las regiones costeras, hielo polar, islas e inclusive zonas continentales [4].

El programa LANDSAT se inicia en el año de 1972, con el lanzamiento del LANDSAT-1. En el año de 1999 se lanzó el LANDSAT-7. Por su parte, el LANDSAT-5 fue lanzado en el año de 1984, y es el satélite de teledetección operativo que más tiempo lleva en órbita [4].

Ha sido el único sistema de satélites diseñado y operado para observar repetidas veces la cubierta de la tierra con una resolución moderada. En la actualidad el programa se encuentra en su octava versión, denominada: *Landsat Data Continuity Mission* (LDCM) [6].

En cuanto a los instrumentos con los que se encuentran equipados los satélites LANDSAT, estos disponen de sensores MSS (*Multispectral Scanner*) y TM (*Thematic Mapper*). El sensor TM, por su parte, tiene una mayor resolución radiométrica (8 bits) que el MSS (6 bits) [4].

Otro de los sensores es el MSS (*Multispectral Scanner Sensor*), el cual se incorporó a los satélites LANDSAT 1-5; y las imágenes consisten en cuatro bandas espectrales con 60 metros de resolución espacial. El sensor TM se incorporó en el LANDSAT-4 y LANDSAT-5. Las imágenes consisten en seis bandas espectrales, con una resolución espacial de 30 metros para las bandas 1-5 y 7, y una banda térmica (banda 6) de 120 metros de resolución espacial [6].

Landsat 1-3		Landsat 4-5	
Bandas	Longitud de onda (μm)	Bandas	Longitud de onda (μm)
		Banda 1 - Azul	0.45-0.52
Banda 4 - Verde	0.5-0.6	Banda 2 - Verde	0.52-0.60
Banda 5 - Rojo	0.6-0.7	Banda 3 - Rojo	0.63-0.69
Banda 6 - Infrarrojo Cercano (NIR)	0.7-0.8	Banda 4 - Infrarrojo Cercano (NIR)	0.76-0.90
Banda 7 - Infrarrojo Cercano (NIR)	0.8-1.1		
		Banda 5 - Infrarrojo de onda corta (SWIR) 1	1.55-1.75
		Banda 6 - Térmica	10.40-12.50
		Banda 7 - Infrarrojo de onda corta (SWIR) 2	2.08-2.35

Figura 12: Características de las imágenes del programa LANDSAT 1 a LANDSAT 5.
Fuente: Tomado de Bermudez (2018) [6].

El satélite LANDSAT-7 incorpora el sensor ETM (*Enhanced Thematic Mapper*) que añade a las bandas ya disponibles en el TM, un canal pancromático con resolución espacial de quince metros. Las imágenes constan de 7 bandas espectrales con una resolución espacial

de 30 metros para las bandas 1-5 y 7, teniendo la térmica (banda 6) una resolución espacial de 60 metros, pero remuestrada a píxeles de 30 metros [6]. Su órbita se sitúa a setecientos cinco kilómetros de altitud, y sobrevuela la misma zona cada dieciséis días [4].

Landsat 7 (ETM+)		Landsat 8 (OLI)	
Bandas	Longitud de onda (μm)	Bandas	Longitud de onda (μm)
		Banda 1 - Aerosol costero	0.43-0.45
Banda 1 - Azul	0.45-0.52	Banda 2 - Azul	0.45-0.51
Banda 2 - Verde	0.52-0.60	Banda 3 - Verde	0.53-0.59
Banda 3 - Roja	0.63-0.69	Banda 4 - Rojo	0.64-0.67
Banda 4 - Infrarrojo cercano 1	0.76-0.90	Banda 5 - Infrarrojo cercano (NIR)	0.85 -0.88
NIR 1			
Banda 5 - Infrarrojo cercano 2	1.55-1.75	Banda 6 - SWIR 1	1.57 -1.65
NIR 2			
Banda 7 - Infrarrojo medio	2.08-2.35	Banda 7- SWIR 2	2.11 -2.29
Banda 8 - Pancromático	0.52-0.90	Banda 8 - Pancromático	0.50-0.68
		Banda 9 - Cirrus	1.33-1.38
Banda 6 - Infrarrojo térmico	10.4-12.5	Banda 10 - Infrarrojo térmico (TIRS) 1	10.60-11.19
		Banda 11 - Infrarrojo térmico (TIRS) 2	11.50-12.51

Figura 13: Características de las imágenes del programa LANDSAT 7 y 8.
Fuente: Tomado de Bermudez (2018) [6].

Finalmente, el satélite LANDSAT-8 consta de una plataforma con capacidad de carga de dos sensores de observación terrestre: el primero de ellos denominado OLI (*Operational Land Imager*) con nueve bandas en el espectro óptico, y el segundo, el sensor TIRS (*Thermal Infrared Sensor*) con dos bandas en el infrarrojo térmico [6].

Ambos sensores presentan imágenes con una resolución espacial de 30 metros y resolución temporal de 16 días, siendo la banda pancromática de 15 metros de resolución espacial. Distan del LANDSAT-7 en su resolución radiométrica, ya que el LANDSAT-7 presenta 8 bits, mientras que el LANDSAT-8 presenta 12 [6].

El satélite LANDSAT TMA, con órbita de 705 kilómetros de altitud, es capaz de percibir siete bandas espectrales de forma simultánea; además de poseer una resolución temporal de 16 días, y proporciona información terrestre entre los ochenta y dos grados latitud norte y los ochenta y dos grados latitud sur [4].

Las principales características de las todas plataformas satelitales LANDSAT se presentan a continuación en el cuadro.

Cuadro 2: Características de las plataformas LANDSAT.

Plataforma	Lanzamiento	Sensor	Operación
LANDSAT-1	23/07/1972	MSS	Finalizada: 06/01/1978
LANDSAT-2	22/01/1977	MSS	Finalizada: 05/02/1982
LANDSAT-3	05/03/1978	MSS	Finalizada: 31/03/1983
LANDSAT-4	16/07/1982	MSS, TM	En espera desde 07/1987
LANDSAT-5	01/03/1985	MSS, TM	Dejó de funcionar en 2012
LANDSAT-6	Octubre-1993	MSS, TM	Perdido
LANDSAT-7	29/04/1999	ETMP	Operativo
LANDSAT-8	11/02/2013	OLI, TIRS	Operativo

Nota: Tomado de Gutiérrez (2016) [7].

Las imágenes generadas por los satélites LANDSAT se encuentran compuestas por siete, ocho u once bandas espectrales que, al combinarse producen una amplia gama de imágenes de color que incrementan notablemente sus aplicaciones. Dependiendo del satélite así como del sensor, puede incluirse un canal pancromático y/o uno térmico. De igual manera, las resoluciones espaciales varían de 15, 30, 60 y 120 metros [4].

Cada imagen de los satélites LANDSAT cubre alrededor de un área de 180 x 175 kilómetros cuadrados. Entre las principales aplicaciones para estas imágenes se pueden mencionar la identificación y clasificación de las distintas cubiertas que existen en la superficie terrestre, la determinación de humedades del suelo, clasificación de la vegetación, generación de mapas hidrotermales, así como sus aplicaciones a estudios de naturaleza multitemporal. Es de importancia mencionar que existen imágenes desde el año de 1982 [4].

3.10.1. Ventajas de las imágenes LANDSAT

Entre las diversas ventajas que ofrece el empleo de imágenes del programa LANDSAT se encuentran:

- Las características de resolución espectral, espacial y temporal de las imágenes, así como la disponibilidad de datos históricos, y su facilidad de adquisición, aunado al hecho de la política del programa de una toma continua y a largo plazo [6].
- La comparación entre imágenes de dos o más períodos se realiza en el mismo sistema de referencia, ya que todos los datos del LDCM son referenciados al mismo sistema de coordenadas [6].

- Las imágenes presentan un alto nivel de procesamiento 1T (ortorrectificación), en formato GeoTIFF. Debido a esto, los productos se consideran muy adecuados para análisis de series de tiempo [6].
- El programa LANDSAT 8 (LCDM) mantiene la misma calidad con respecto a sus predecesores. Asimismo los datos presentan compatibilidad en términos de geometría de adquisición, calibración y características de cobertura espectral y espacial [6].
- La misión es de carácter continuo, ya que se tienen contemplados nuevos satélites, tales como el LANDSAT 9 (OLI-2), el cual será una copia del OLI del LANDSAT 8, y proporcionará imágenes infrarrojas visibles, infrarrojas cercanas y de onda corta, contando con las características espectrales, espaciales, radiométricas y geométricas de las misiones anteriores [6].
- Las imágenes cuentan, desde el LANDSAT 8, con bandas en el visible (azul) y el IR (infrarrojo cercano, de onda corta y térmico), que les permiten abordar estudios sobre vegetación, suelos o ya sea zonas urbanas, que no son viables con imágenes de otros sensores [6].

3.11. Procesamiento de imágenes

El procesamiento de imágenes se compone de varios tratamientos que pueden ser aplicados sobre las imágenes, en el que cada uno de estos tiene como objetivo destacar determinadas características de la imagen.

3.11.1. Correcciones radiométricas

El valor radiométrico registrado en cada pixel es la resultante de la energía reflejada, la cual es influenciada por la curvatura de la Tierra y por el relieve, las imprecisiones del sensor, la atenuación atmosférica o dispersión de la energía reflejada, entre otros [2].

Las correcciones radiométricas buscan el minimizar las influencias de los factores antes mencionados y para ello se valen de modelos de corrección que modifican el valor de los píxeles. Estas correcciones pueden ser aplicadas a la totalidad de la imagen o solo parcialmente [2].

3.11.2. Realces

Los realces no hacen más que buscar el mejoramiento visual de la imagen y pueden llevarse a cabo de distintas maneras, aplicándose en cada banda o en toda la imagen. El objetivo final que persiguen los realces es obtener una imagen nueva que facilite la identificación de ciertos rasgos de interés y permite delimitarlos con la mayor precisión posible dentro de las limitaciones de la resolución espacial [2].

3.11.3. Correcciones geométricas

Dado que las imágenes satelitales inicialmente no cumplen con las características geométricas de un mapa o carta, ya que el punto de vista no está en el infinito, lo cual se traduce en que un único rayo de energía electromagnética es ortogonal a la superficie del terreno, mientras que existen distorsiones en la enorme mayoría, se hace necesario realizar las denominadas correcciones geométricas, las cuales son modificaciones de proyección de una imagen las cuales permiten realizar los cambios necesarios para que los datos puedan ser utilizados en cartografía. Consisten básicamente en la identificación y posicionamiento de los elementos muestrales en la imagen y en el terreno [2].

3.11.4. Georreferenciación

La georreferenciación se refiere al proceso mediante el cual se asignan coordenadas específicas de un sistema de referencia de coordenadas de ubicación geográfica a una imagen. Cabe mencionar que las imágenes pueden ya contener una proyección al plano deseada, sin embargo no necesariamente estar referenciadas a un sistema de coordenadas apropiado [2]. Existe otro proceso, el cual es rectificación, que se encuentran incluido dentro de la georreferenciación, debido a que todos los sistemas de proyección están asociados a un sistema de coordenadas. La georreferenciación incluye por si misma el cambio de la información sobre las coordenadas en la imagen, por lo que la grilla ráster de la imagen y su identidad no se ven afectados por ninguna modificación [2].

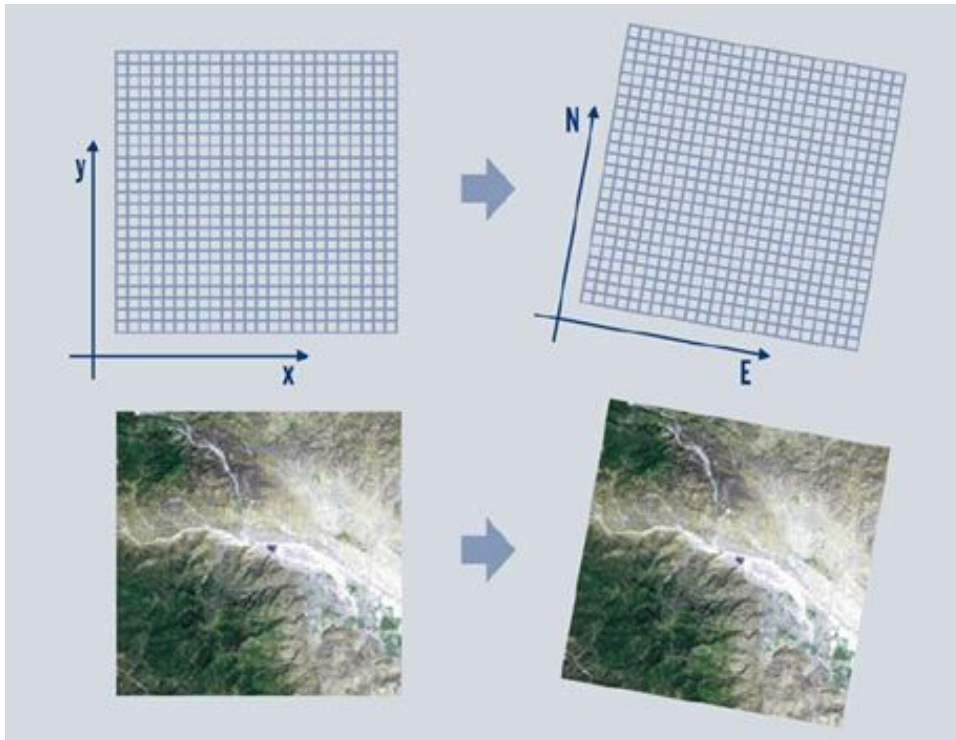


Figura 14: Georreferenciación de imágenes.
Fuente: Tomado de Erba (2007) [2].

3.11.5. Ortorrectificación de imágenes

La orrorrectificación, por su parte, es el procesos mediante el cual se permiten eliminar la influencia de imperfecciones geométricas propias de las fotografías aéreas o de las imágenes satelitales generadas por la orientación de la cámara o sensor, por la existencia de errores sistemáticos asociados a la cámara o sensor, y por desplazamientos provocados por el relieve topográfico o la curvatura terrestre [2].

3.12. Clasificación de imágenes

La clasificación de imágenes se da a través de la clasificación multispectral, que consiste en el proceso de agrupar píxeles en un número finito de clases individuales (o categorías de información) basado en sus propios valores. Si el valor de un píxel satisface ciertos criterios, se le asigna el (nuevo) valor correspondiente a la clase que reúne los criterios de interés [2].

La clasificación, entonces, se basa en asumir que un fenómeno en la imagen tienen correspondencia en el terreno, es decir, que una misma clase de objetos en el terreno tiene características similares (misma firma espectral) [2].

Existen dos aproximaciones para realizar la clasificación de imágenes: la clasificación supervisada y la clasificación no supervisada. Sea cualesquiera de las dos aproximaciones utilizadas, el resultado debe ser comprobado en el terreno y el resultado cartográfico es una nueva imagen que puede ser considerada una carta temática, en la cual cada clase tiene un valor y un color.

3.12.1. Clasificación supervisada

La clasificación supervisada trabaja a partir de datos veraces del terreno obtenidos mediante observación directa, los cuales se usan para determinar los parámetros iniciales usados en la clasificación. A cada clase de interés a ser cartografiada (agua, áreas densamente construidas, espacios verdes, entre otros) se le asigna un nombre y un color. En este caso un especialista trabaja sobre una imagen proyectada en un monitor, identificando lugares que contienen las clases de objetos buscados y color y marca un pequeño círculo sobre la imagen. El aplicativo calcula los valores espectrales de cada círculo y, a largo plazo, determina y busca en forma automática o manual la misma firma espectral en toda la imagen. En este proceso, cada píxel de imagen es clasificado de acuerdo a la probabilidad de pertenencia a una clase en particular [2].

Método de la mínima distancia

Este método toma como base la estimación de la mínima distancia (distancia euclidiana) al centroide estimado del conjunto de píxeles de la clase de estudio (Figura 15). En términos de geometría, estas clases generan una serie de hiperesferas a las que se les toma la mínima distancia. El píxel entonces será asignado al conjunto cuya distancia sea menor [8].

Método de paralelepípedos

Este método se basa en la definición de paralelepípedos que definen las fronteras de cada clase (Figura 15). Un píxel incógnito, por lo tanto, es clasificado dependiendo del paralelepípedo al cual se inscribe. La definición de cada uno de los paralelepípedos debe hacerse teniendo en cuenta los valores máximos y mínimos de reflectividad para cada una de las bandas, pero pueden presentarse píxeles que no son clasificados, representando otras clases que no se han tenido en cuenta, o ya sea resultan demasiado complejos para asignarlos a una clase [8].

Método de máxima verosimilitud

También denominado como Clasificador Gaussiano, este método parte de tener una muestra de reflectividad para cada clase y cada banda (Figura 15). Puede calcularse, como consecuencia, la media y la desviación estándar de cada una de las clases y utilizar algún modelo de distribución de probabilidad. El clasificador de máxima probabilidad asume que los datos siguen una función de distribución normal para asignar la probabilidad de que un píxel cualquiera pertenezca a una de las clases determinadas. De esta forma, el píxel se asigna a la clase a la que es más probable que pertenezca. Este método puede ser empleado pese a que la hipótesis de que los datos de reflectividad siguen una distribución normal no siempre se cumpla [8].

Puede emplearse de manera automática o puede establecerse algún criterio que permita asignar píxeles a una clase solo si la probabilidad correspondiente sea superior a determinado umbral. Permite, por otro lado, definir algún tipo de criterio para medir la calidad de la asignación, por ejemplo la diferencia entre la máxima probabilidad y la siguiente [5].

Método de Mahalanobis

Este método es muy parecido al método de mínima distancia, con la diferencia de que toma la distancia de Mahalanobis, la cual considera la variabilidad de clases (dispersión de clases) y la correlación de píxeles. La figura generada no es una hiperesfera, y su localización, forma y tamaño de las elipses reflejan la media, variancia y covarianza de los datos [8].

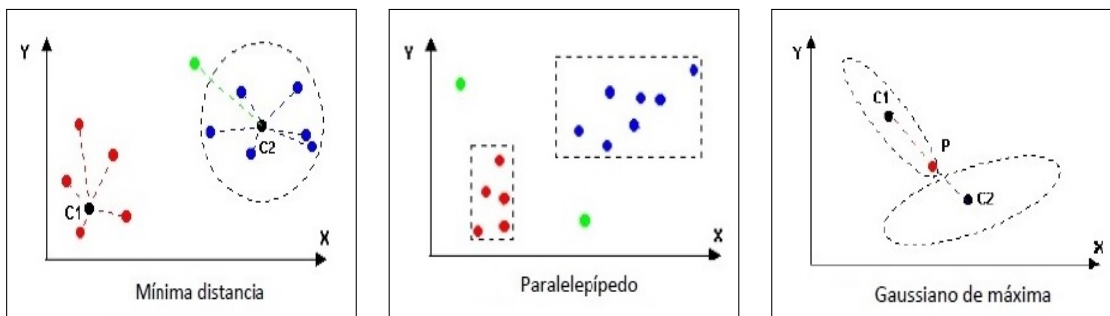


Figura 15: Métodos de asignación de píxeles a una categoría.

Fuente: Tomado de Coutiño (2012) [5].

3.12.2. Clasificación no supervisada

La clasificación no supervisada, a diferencia de la supervisada, no requiere de una visita previa al terreno. Se inicia con la aplicación de un procedimiento matemático estadístico no supervisado, a través del cual la computadora halla valores de píxel que tienen la misma característica, los clasifica y forma grupos *clusters* [2].

3.13. Verificación de resultados

El producto final de una clasificación, ya sea esta de carácter visual o de naturaleza digital, es un un mapa temático, en donde el territorio bajo estudio se encuentra dividido en una serie de unidades especiales, cuyo significado presentan una relación de coherencia con la leyenda de trabajo. Dicho proyecto puede ser, ya sea, punto de inicio para otros estudios, un producto final o un producto intermedio al que se pueden agregar otras variables geográficas [1].

Toda clasificación lleva asociado un cierto margen de error, en función de la calidad de los datos que se han empleado para su realización, o de la rigurosidad del método empleado. Es por este motivo que resulta obligatorio aplicar algún procedimiento de verificación que permita cuantificar dicho error, y en función de este, realizar una valoración de la calidad final del trabajo y su aplicabilidad operativa [1].

3.14. Fuentes de error en una clasificación temática

Como se mencionó anteriormente, la fiabilidad de un mapa temático depende, mayormente, de la metodología y de la calidad de los datos sobre los que se aplica esta.

La interpretación visual implica un mayor grado de supervisión que el tratamiento digital de imágenes, y se realiza, normalmente, a menor escala, debido al hecho obvio de que se cubren grandes extensiones, lo que supone manejar leyendas con menor detallamiento.

Chuvieco (1995) [1], clasifica las fuentes de errores en cuatro grandes grupos a saber:

- Los errores relacionados con el terreno de estudio.
- Aquellos relacionados con el nivel de precisión requerido en la leyenda.
- Los errores relacionados con la adquisición de la imagen.
- Los errores relacionados con factores medioambientales externos.

3.14.1. Estructura del territorio

Los errores relacionados con la estructura del territorio hacen alusión a las confusiones que pueden llegar a darse derivadas de la disposición espacial con que se presentan las

cubiertas objeto de estudio. En este tipo de errores se incluyen aspectos como por ejemplo la forma, la orientación y principalmente el tamaño y contraste espacial entre cubiertas vecinas, así como el grado de mezcla en los distintos tipos de cubierta [1].

3.14.2. Adquisición de las imágenes

Los errores relacionados con la adquisición de imágenes hacen referencia principalmente a fallas o problemas en el funcionamiento del sensor o plataforma, o ya sea a la influencia atmosférica, o, en su defecto, a fallas en los sistemas de recepción y/o grabación de la imagen [1].

3.14.3. Condiciones medioambientales

En el caso de los errores medioambientales estos se deben a factores diversos tales como la pendiente, orientación, que repercuten en posibles varianzas espectrales en torno al comportamiento de una cubierta. Tales dispersiones dificultan la caracterización espectral de una clase, pudiendo provocar confusiones con categorías vecinas [1].

3.15. Tamaño de la muestra

Diversos autores sugieren que, en cuanto al tamaño de la muestra, esta debe de cubrir una superficie aproximada al 1 % de la superficie cartografiada [1]. Sin embargo, en la gran mayoría de los muestreos, el tamaño de la muestra depende del nivel de probabilidad o de confianza que quiera otorgarse a la estimación, así como de la propia variabilidad de la imagen considerada. Dado que la variable que se trata de medir es de naturaleza binomial (acierto-errores), comúnmente se emplea la fórmula siguiente:

$$n = \frac{z^2 \cdot p \cdot q}{E^2} \quad (5)$$

donde:

- z = es la abcisa de la curva normal para un nivel determinado de probabilidad.
- p = porcentaje de aciertos estimados.
- q = porcentaje de errores estimados ($q = 1 - p$)
- E = nivel permitido de error [6].

De no conocerse el valor p , el medio más conservador para determinar el tamaño de la muestra es utilizar un valor p de 0.5 [3].

3.16. Matrices de confusión

Una matriz de confusión es una matriz que recoge los conflictos que se presentan entre categorías. Se trata de una matriz bidimensional, en donde las filas se ocupan por las clases de referencia, y las columnas por las categorías deducidas de la clasificación. Obviamente ambas tendrán el mismo número y significado, y tratan, en resumen, de una matriz de $n \times n$, donde n indica el número de categorías. Esta matriz es comparada con puntos para las cuales se conoce tanto su cobertura real como la deducida por la clasificación [1].

Otra de las definiciones asignada a las matrices de confusión es la de tabla de contingencia o matriz de error, que para el caso de mapas temáticos, permite evaluar la exactitud de dichos mapas para conocer su precisión, y, fundamentalmente consiste en estimar el número de puntos que han sido correctamente cartografiados dentro de un conjunto de datos. Esta matriz es entonces construida de muestras de puntos de un mapa, por lo que deben de contarse con datos de referencia, para lograr la verificación a través de datos de campo, los cuales son representados en columnas y que son comparados con la interpretación representada en las filas dentro de la matriz [3].

La diagonal de esta matriz expresa el número de puntos de verificación en donde se produce acuerdo entre las dos fuentes (mapa y realidad), mientras que los valores marginales suponen errores de significación. La relación entre el número de puntos correctamente asignados y el total expresa la fiabilidad global del mapa. Los valores residuales en filas indican tipos de cubierta real que no se incluyeron en el mapa, mientras que los valores residuales de columnas implican cubiertas del mapa que no se ajustan a la realidad. De manera resumida, estos valores representan los errores de omisión y de comisión, respectivamente [1].

		Clasificación Verificada (Terreno)										Total	ExU	ESA
		Ar	Au	E	Bn	Bp	Ca	M	P	Sd	A			
Clasificación (Imagen)	Ar	3										3	100,0	0,0
	Au		3									3	100,0	0,0
	E			2								2	100,0	0,0
	Bn				4	1						5	80,0	20,0
	Bp					6						6	100,0	0,0
	Ca						2					2	100,0	0,0
	M					1		16	1			18	88,89	11,1
	P								7			7	100,0	0,0
	Sd									2		2	100,0	0,0
	A										1	8	88,9	11,1
	Total		3	3	2	4	8	2	16	8	2	8	57	
ExP		100,0	100,0	100,0	100,0	75,0	100,0	100,0	77,8	100,0	100,0			
ESE		0,0	0,0	0,0	0,0	25,0	0,0	0,0	22,2	0,0	0,0			

Figura 16: Ejemplo de matriz de confusión entre clases.
Fuente: Tomado de Coutiño (2012) [5].

Un aspecto importante a destacar sobre el cual es necesario hacer hincapié para la realización de un análisis riguroso son las celdas marginales. De acuerdo con Sánchez (2009) [3], «en el caso de las filas, los marginales indican el número de píxeles que, perteneciendo a una determinada categoría, no fueron incluidos en ella. Estos se denominan errores de omisión.

De igual forma, las celdas no diagonales de las columnas expresan los errores de comisión, píxeles que se incluyeron en una determinada categoría perteneciendo realmente a otra».

La importancia y el interés se basan en su capacidad para plasmar los conflictos entre categorías. De esta forma, no solo se conocen la correcta asignación de los puntos de muestreo, sino también la fiabilidad para cada una de las clases analizadas y las principales confusiones que pudieran presentarse entre estas [1].

Ahora bien, además de presentar de manera gráfica los resultados de la clasificación, de la matriz de confusión se pueden generar tres parámetros más, los cuales se traducen como tres tipos de exactitud asociada a la clasificación en cuestión. Dichos parámetros son la exactitud global, la exactitud del usuario y la exactitud del productor [9].

Exactitud global (F_m)

La exactitud global indica la exactitud del conjunto de las clases del método a evaluar o, en otras palabras, cuantifica la cantidad de puntos correctamente clasificados [10].

$$F_m = \frac{\sum_{i=1}^r x_i}{n} \quad (6)$$

donde:

- x_i , valor de la diagonal de la fila i .
- r , número de filas de la matriz.
- n , número total de puntos de verificación.

Ahora bien, el resultado arrojado para el cálculo de la exactitud o fiabilidad global constituye únicamente una estimación basada sobre la muestra. En concordancia con la teoría del muestreo pueden calcularse los umbrales inferior y superior en los que se encontraría la exactitud real alcanzada por el mapa [1]. Dicho intervalo es calculado para un determinado nivel de significancia (α), a partir del error de muestreo (ES) y del nivel de probabilidad [1].

$$F = F_m \pm z \cdot ES \quad (7)$$

donde:

- z , indica la abscisa del área bajo la curva normal para ese nivel de probabilidad ($1-\alpha$).
- ES , es el error estándar del muestreo, en función del porcentaje de aciertos (p), de fallos (q) y del tamaño de la muestra (n) [1].

$$ES = \frac{\sqrt{p \cdot q}}{n} \quad (8)$$

Errores de comisión (E_{ci})

Indica la probabilidad de que un píxel de la clase (i) está correctamente clasificado [10].

$$E_{ci} = \frac{X_{+i} - X_{ii}}{X_{+i}} \quad (9)$$

donde:

- X_{+i} , indica el valor marginal de la columna i .
- X_{ii} , indica la diagonal de dicha columna [1].

Errores de omisión (E_{oi})

Indica la probabilidad de que un píxel clasificado como clase (i) corresponda realmente a dicha clase [10].

$$E_{oi} = \frac{X_{i+} - X_{ii}}{X_{i+}} \quad (10)$$

donde:

- X_{i+} , indica el valor marginal de la fila i .
- X_{ii} , indica la diagonal de dicha fila [1].

Precisión de usuario y del productor

Los errores de omisión y comisión expresan dos enfoques del mismo problema. Los errores de omisión, por su parte, se refieren a una definición imperfecta de la categoría [1].

$$F_{oi} = \frac{X_{ii}}{X_{i+}} \cdot 100 \quad (11)$$

donde:

- X_{i+} , indica el valor marginal de la fila i .
- X_{ii} , indica la diagonal de dicha fila [1].

Los errores de comisión, hacen alusión a una delimitación excesiva del usuario y del productor [1].

$$F_{pi} = \frac{X_{ii}}{X_{+i}} \cdot 100 \quad (12)$$

donde:

- X_{+i} , indica el valor marginal de la columna.
- X_{ii} , indica la diagonal de dicha columna i [1].

3.16.1. Coeficiente Kappa

El coeficiente Kappa es otra de las medidas, altamente difundida, de medir la exactitud de un mapa. También conocido como “ κ ”, permite medir la exactitud de manera más precisa que la matriz de confusión ya que incluye dentro de su cálculo todos los valores de la matriz, y no solamente sus extremos [3].

La expresión para el cálculo del coeficiente KAPPA es la siguiente:

$$\kappa = \frac{N \sum_{i=1}^r x_{ii} - \sum_{i=1}^r (x_{i+} \cdot x_{+i})}{N^2 - \sum_{i=1}^r (x_{i+} \cdot x_{+i})} \quad (13)$$

donde:

- r , número de filas
- x_{ii} , número de observaciones en una fila. i y una columna i .
- x_{+i} y x_{i+} , son los totales marginales de una fila i y una columna i , respectivamente.
- N , es el total de número de observaciones [3].

El valor de κ varía entre 0 a 1, en donde un mayor índice Kappa indica una mejor clasificación; así, un valor cercano a 0 sugiere que el acuerdo observado se debe al azar. Un coeficiente de 0.9 significa que la clasificación es 90 % mejor que la confiabilidad esperada, afectando aleatoriamente una clase de cobertura a los polígonos. También diversos autores suelen dividir este índice en seis clases, y según la clasificación, el resultado es aceptado o rechazado.

En el cuadro siguiente se muestran las clases en las que el índice Kappa es segmentado.

Cuadro 3: Categorías de concordancia de validación para el coeficiente Kappa

Rango	Concordancia
0	Nula
0.01 - 0.20	Leve
0.21 - 0.40	Aceptable
0.41 - 0.60	Moderada
0.61 - 0.80	Considerable
0.81 - 1.00	Casi perfecta

Nota: Tomado de Alzate (2018) [8].

3.17. Análisis multitemporal

El término “análisis multitemporal” hace referencia a todos aquellos tipos de análisis o estudios basados en la comparación de un parámetro o cobertura de dos o más imágenes satelitales o mapas de un mismo lugar en diferentes fechas, posibilitando la evaluación y valoración de los cambios de las coberturas estudiadas o parámetros de interés que previamente han sido clasificadas [3].

Cabe destacar que a través de trabajos de análisis multitemporal, los estudios sobre los cambios en la cobertura de la tierra sientan la base para conocer el comportamiento y las tendencias de los procesos como deforestación, degradación, desertificación y pérdida de biodiversidad de una región determinada [3].

Tal y como menciona Sánchez (2009) [3], los análisis de cambio de uso de la tierra usan la cobertura, la cual es entendida como el conjunto de la vegetación que es visualizada desde el espacio, como el atributo principal que permite reconocer cambios en un determinado período de tiempo en una región geográfica. Este proceso de análisis implica, entonces, cruzar y analizar digitalmente mapas de la cobertura y usos de suelo de dos o más fechas distintas.

El requisito básico para la realización de un análisis multitemporal es que la información cartográfica a utilizar sea comparable desde diversos aspectos o parámetros, tales como la misma área, escala y proyección cartográfica, y que a su vez sea compatible, es decir, que el contenido (o leyenda) o ya sea, las categorías representadas en los diversos mapas sean equivalentes [3].

El análisis multitemporal de una región es considerado un procedimiento cartográfico confiable para cuantificar y analizar la dinámica asociada a un territorio y la transformación de la vegetación y usos de suelo a lo largo del período de análisis [3].

3.18. Sistemas de información geográfica (SIG)

Un sistema de información geográfica (SIG o GIS, en su acrónimo inglés –Geographic Information System) se entiende como una integración organizada de hardware, software y datos geográficos diseñada con la finalidad de capturar, almacenar, manipular, analizar

y desplegar en todas sus formas la información geográficamente referenciada con el fin de resolver problemas complejos de planificación y gestión [11].

La base sobre la que se apoya un Sistema de Información Geográfica se encuentra en el uso de mapas digitales, en los que se representan diversas variables o parámetros, o bien, mapas que representan diversos objetos a los que corresponden varias entradas en una base de datos. Esta estructura en un SIG permite combinar, en un mismo sistema, información con orígenes y formatos diversos, lo que a su vez permite incrementar el grado de conocimiento sobre la información manipulada [4].

En referencia a los sistemas de información geográfica, Coutiño (2012) [5] menciona que, por su parte, destaca que los SIG son un caso particular de un sistema de información (SI), en la que la unión de información en formato digital y herramientas informáticas permite y posibilita el análisis con objetivos específicos; siendo su principal característica que la información aparece georreferenciada, es decir, se detalla su posición en el espacio, mediante el uso de sistemas de coordenadas estandarizados, dando como resultado una proyección cartográfica, que en la mayoría de las ocasiones es de tipo UTM (Universal Transversal Mercator).

3.19. Aplicaciones de los SIG

Los sistemas de información geográfica son herramientas que tienen un amplio rango de aplicaciones para una gran variedad de ramas, dada su gran versatilidad y la posibilidad de manipular variables y parámetros de diversas características y naturalezas, por lo que su uso es muy extendido y variado.

Entre las muchas aplicaciones que actualmente se conocen de los Sistemas de Información Geográfica se mencionan los siguientes:

Planificación de recursos

Este tipo de aplicaciones permite, como lo indica su nombre, la planificación de los recursos naturales, a través del uso de imágenes de tipos de suelos, con lo que se posibilita determinar la vocación de los suelos y de esa manera planear un uso u ocupación futuro de estos, por medio de la realización de modelos para el comportamiento de los recursos, los cuales permitan su aprovechamiento sin agotarlos irremediabilmente [12].

Arqueología

Dentro del campo de la arqueología, los Sistemas de Información Geográfica pueden ser utilizados para un sinnúmero de tareas tales como la elaboración de guías turísticas con el fin de informar acerca de las mejores rutas para llegar a sitios arqueológicos, investigaciones científicas relacionadas con territorios ocupados por dichos sitios, la creación de modelos para la observación del impacto de asentamientos y construcción de edificaciones cercanas a este tipo de sitios, entre muchas otras actividades [12].

Catastro

En lo referido a catastro, algunas de las aplicaciones que pueden encontrarse son la elaboración de información catastral, la facilitación de planificación para la ejecución de obras públicas, la determinación de la ocupación del suelo de una región de estudio, así como la generación de información detallada acerca del tipo de construcciones en una ciudad con vista en aplicaciones del manejo y reducción de riesgos.

Igualmente se pueden mencionar aplicaciones en las que se conjugan diversas ramas, como por ejemplo la generación de registros catastrales para la determinación de la recaudación de los impuestos de las propiedades, entre muchas otras. [12].

Cartografía

En lo que se refiere a cartografía, esta es una de las más destacadas y comunes aplicaciones que se encuentran de los Sistemas de Información Geográfica, consistente básicamente en la generación de mapas temáticos acerca de diferentes fenómenos de estudio, como por ejemplo mapas de intensidad de lluvias, zonas de alto riesgo de derrumbes durante el invierno, zonas de gran tránsito peatonal, por solo mencionar algunos ejemplos [12].

Redes de infraestructura

Otra de las aplicaciones que puede encontrarse de los Sistemas de Información Geográfica son aquellas relacionadas a trabajos de planeación y mantenimiento de recursos públicos (sistemas de drenajes, redes de distribución de agua potable, sistemas de electrificación, registros de catastro inmobiliario, ubicación de instituciones como escuelas, parques, hospitales, etc.) con el fin de contar con un inventario de todos estos recursos así como su localización exacta [12].

Sin embargo, este tipo de aplicaciones no se limitan únicamente a la generación de inventarios y registros, sino que permiten acciones tales como una mejor distribución de recursos y servicios, análisis del aprovechamiento de estos, y estudios de vinculación de fenómenos sociales de acuerdo al nivel de concentración de dichos recursos [12].

Urbanismo

En cuanto a urbanismo, los Sistemas de Información Geográfica son herramientas muy importantes, que permiten desarrollar tareas tales como el establecimiento de objetivos y limitaciones del desarrollo urbano de una ciudad o región, la planificación de los servicios públicos, aplicaciones relacionadas con estudios y análisis de transporte, proyectos de protección ambiental, así como la determinación de zonas de riesgo, y sin dejar de mencionar, temas relacionadas con el ordenamiento y gestión territorial [12].

3.20. Teledetección y SIG

Existe una relación directa entre la teledetección y los Sistemas de Información Geográfica, la cual hace referencia principalmente al concepto de “actualización”, debido a que los Sistemas de información Geográfica permiten trabajar la información geográfica y obtener como producto resultados digitales. La digitalización es una labor ardua que le compete directamente a los SIG, aunque, debe decirse, la tarea y vínculo de estos con la teledetección no se limitan a esta tarea únicamente [1].

De hecho, los SIG son herramientas que complementan las labores desarrolladas dentro del campo de la digitalización, pues, permiten realizar tareas como:

- Digitalización de mapas temáticos a partir de interpretaciones visuales de imagen.
- Digitalización de mapas temáticos obtenidos a partir de la clasificación digital de una imagen.
- Incorporación directa de la información a los SIG.
- Procesamiento de información e imágenes obtenidas a través de técnicas de teledetección.

De esta cuenta, puede entenderse que la labor de los Sistemas de Información Geográfica es muy importante, pues, para el caso de aplicaciones como estudios de naturaleza multitemporal, el procesamiento o trabajo de gabinete de las imágenes satelitales debe realizarse con un SIG, por lo que para este tipo de tareas y fines existe una definida complementariedad entre un SIG y la información obtenida a través del empleo de teledetección [12] .

3.21. Software QGIS

Quantum GIS o simplemente en su forma abreviada QGIS es una aplicación orientada al trabajo con información geográfico que se encuentra bajo la licencia GNU/GPL (General Public License). La aplicación se encuentra diseñada para desarrollar tareas tales como la visualización, administración, la edición, análisis de datos así como la composición de mapas que posteriormente pueden llegar a ser impresos [7].

La aparición de esta aplicación se dio después de la búsqueda de un visualizador SIG para el sistema operativo Linux, el mismo que era rápido y que era capaz de trabajar con una gran cantidad y gama de datos. Este visualizador, junto con algunas mejoras desembocó en la creación del proyecto QGIS [7].

QGIS proporciona una serie de funciones y complementos para trabajar con los datos geográficos más comunes (de tipo vectorial y ráster). Entre las principales funcionalidades de la aplicación se pueden mencionar:

- Visualización de diferentes formatos y proyecciones sin la necesidad de conversión en algún formato específico.

- Exploración de datos y creación de mapas de forma interactiva.
- Realización de análisis espaciales de datos de tipo geográfico. En la actualidad es capaz de desarrollar tareas que van desde el análisis vectorial, muestreos, geoprocésamiento, hasta herramientas de bases de datos.
- Publicación de mapas en internet mediante servidores web.

Pese a las tareas antes mencionadas, el software QGIS puede ampliar sus funcionalidades a través de la instalación y uso de complementos –plugins– los cuales permiten la realización de tareas específicas [7].

- Complementos de núcleo, los cuales son creados usando diversas bibliotecas que proporciona el software y el equipo de QGIS. Entre los más importantes se encuentran: herramientas GPS (carga e importación de datos GPS), la función GRASS destinada a tareas vinculadas con hidrología, entre otros.
- Complementos externos, programados en lenguaje de Python, los cuales son creados por la comunidad usuaria del programa, y que se encuentran disponibles en el repositorio oficial de programa, de nombre PyQGIS.

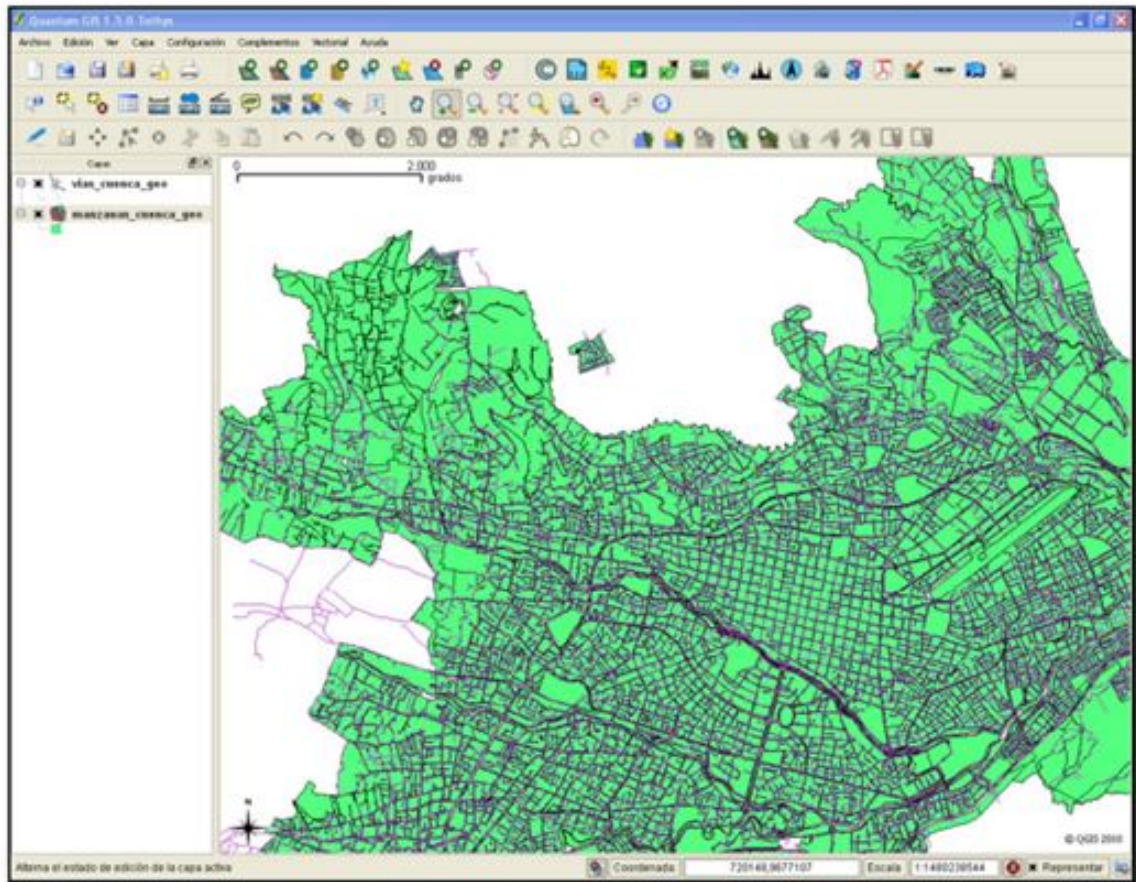


Figura 17: Interfaz de usuario del software QGIS.
Fuente: Tomado de Guiñanzaca (2011)[7].

3.22. Complemento SCP de QGIS

La herramienta SCP (Semi-automatic Classification Plugin) es un complemento gratuito de código abierto que permite la clasificación semiautomática (también permite la clasificación supervisada y no supervisada) de imágenes satelitales, además de que permite la descarga de forma gratuita de imágenes satelitales de diversas plataformas, además de posibilitar tareas como le pre-procesamiento de imágenes así como el cálculo en archivos tipo ráster, entre otras opciones [13].

De acuerdo con su creador, el objetivo principal del complemento SCP es «proporcionar un conjunto de herramientas interrelacionadas para el procesamiento ráster con el fin de hacer un flujo de trabajo automático y facilitar la clasificación de la cobertura del suelo, que puedan ser usados por gente cuyo campo principal no sea la teledetección»[13].

La primera versión de este complemento fue desarrollada en el año 2012, por Luca Congedo, con el fin de crear una herramienta para la clasificación de campos de una manera razonable, automática y económica [13].

Las versiones subsiguientes respondieron a un compromiso personal del creador con el campo de la teledetección y el software de código abierto [13].

La ventana principal del complemento se muestra en la Figura 18, mientras que la interfaz general se muestra en la Figura 19.

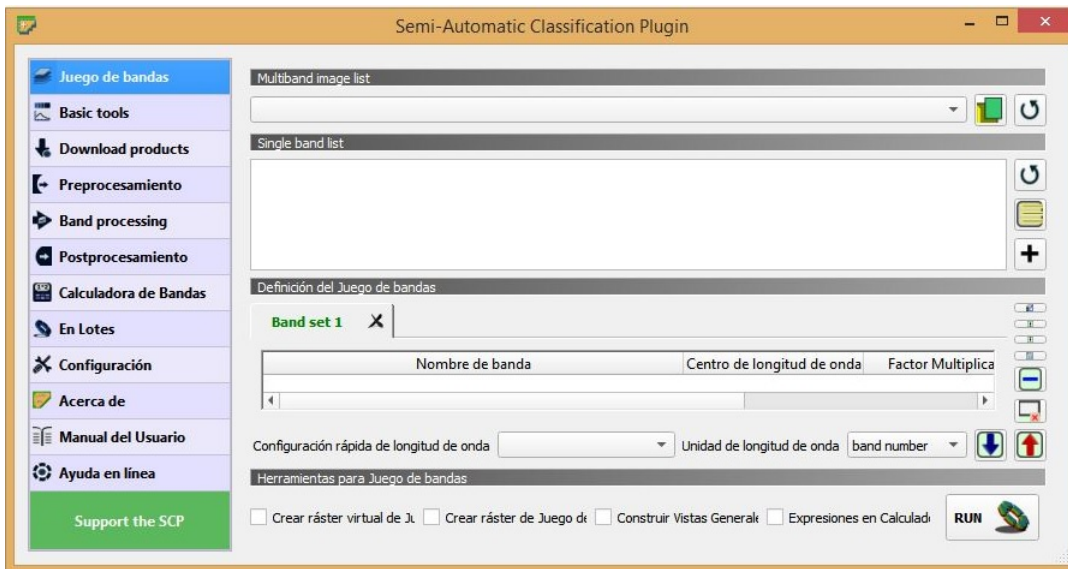


Figura 18: Ventana de funciones principales del complemento SCP.
Fuente: Tomado de Congedo (2018) [13].

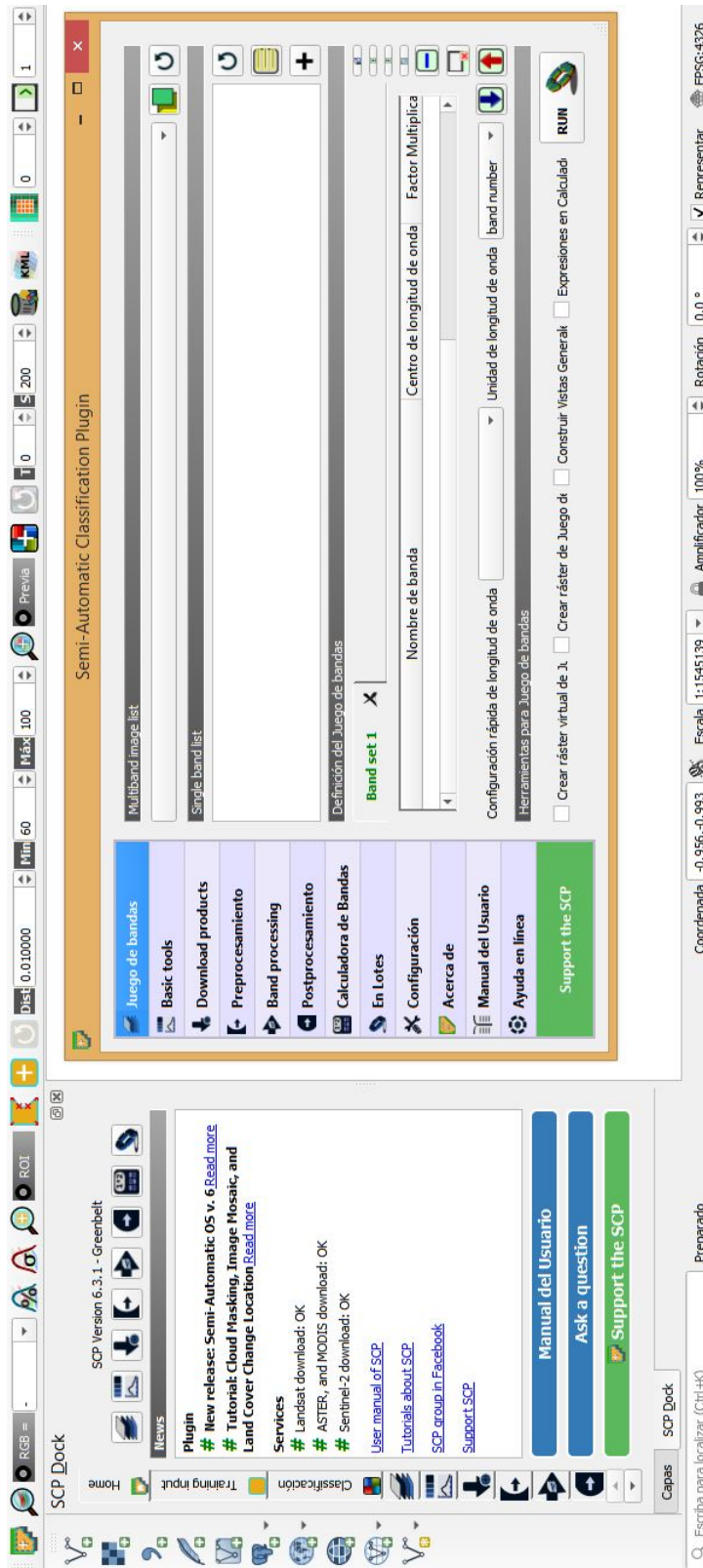


Figura 19: Complemento SCP de QGIS.
Fuente: Tomado de Congedo (2018) [13].

4.1. Área de estudio

El área establecida para el estudio multitemporal corresponde a la extensión total del municipio de Cobán, Alta Verapaz (latitud - 15° 28' 07" y longitud - 90° 22' 36") cuya superficie es de aproximadamente 2,132 km².

Pese a que el estudio realizado se centra en el análisis urbano, se eligió utilizar todo el municipio con el fin de tener un área y perímetro conocidos y no hacer uso de áreas arbitrarias, las cuales son de carácter subjetivo.



Figura 20: Municipio de Cobán, Alta Verapaz.
Fuente: Elaboración propia.

4.2. Procesamiento de imágenes satelitales

El procesamiento de las imágenes satelitales es una actividad de suma importancia en la posterior interpretación, ya que persigue una serie de fines que mejoran la calidad de la información a manipular, tales como la eliminación de información anómala (ruido), la posible restauración de información perdida, la posible edición de errores generados durante la adquisición de la imagen o la transmisión de estas a las áreas de recepción.

Para la realización del estudio multitemporal de la dinámica urbana del municipio de Cobán, se utilizaron imágenes que abarcaron por completo el área de estudio correspondiente a todo el municipio. Se emplearon imágenes del programa LANDSAT, obtenidas del portal <http://earthexplorer.usgs.gov>. Las imágenes seleccionadas corresponden a las misiones LANDSAT 5, 7 y 8 para los años de interés de 1990, 2000 y 2015, respectivamente.

En el siguiente cuadro se enlistan las imágenes utilizadas:

Cuadro 4: Listado de imágenes LANDSAT.

Sensor	Fecha	Nombre
LANDSAT 5	19/01/1990	LT05_1TP_020049_19900119_20170131_01_T1
LANDSAT 7	23/01/2000	LE07_L1TP_020049_20000123_20170213_01_T1
LANDSAT 8	05/02/2015	LC08_L1TP_020049_20150225_20170301_01_T1

Nota: Elaboración propia.

Las imágenes utilizadas corresponden a las de menor presencia de nubes durante todo el año, razón por la cual la imagen del año 2015 corresponde al mes de febrero, en comparación con las imágenes de los años 1990 y 2000, que son del mes de enero.

Con las imágenes ya obtenidas, se procedió a realizar la conversión de la imagen a reflectancia.

4.2.1. Conversión de la imagen a reflectancia: Corrección DOS1

El *Dark Object Subtraction*, o substracción de objeto oscuro, corresponde a una familia de correcciones atmosféricas basadas en imagen, cuyo principio parte de la suposición básica de que en la imagen algunos píxeles están en completa sombra, y sus radiancias recibidas por el satélite se deben a la dispersión atmosférica (o efecto bruma). Esta suposición a su vez se combina con el hecho de que muy pocos elementos en la superficie terrestre tienen un color negro absoluto, por lo que se asume una reflectancia de un uno por ciento (1%), que es mejor que un cero por ciento (0%) [13].

Es importante mencionar que la corrección DOS1 fue el único procedimiento de procesamiento aplicado a las imágenes satelitales utilizadas para el estudio, dado que las imágenes ya están georreferenciadas, y ortorrectificadas al momento de su obtención digital.

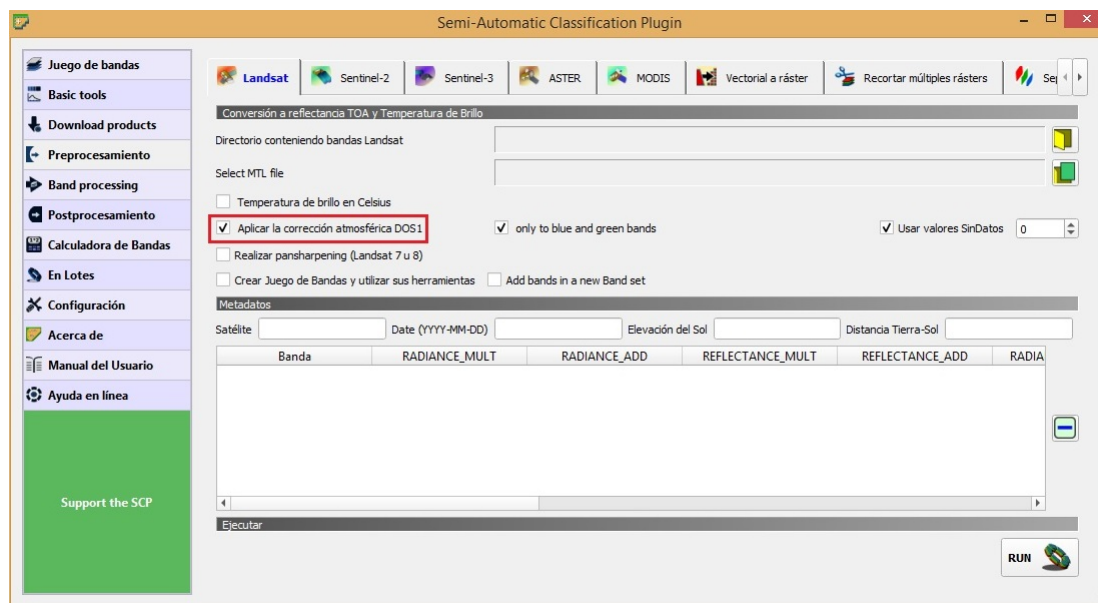


Figura 21: Conversión de la imagen a reflectancia.
Fuente: Elaboración propia.

4.2.2. Creación del archivo multispectral

Se generó un archivo de juego de bandas, a través del complemento SCP del programa QGIS, para las bandas del espectro visible, las bandas de infrarrojo cercano (NIR) e infrarrojo medio (SWIR 2) conforme a cada imagen de satélite correspondiente.

4.3. Clasificación de las imágenes y áreas de entrenamiento

4.3.1. Clasificación

La clasificación aplicada para las imágenes empleadas para el estudio en cuestión fue de carácter supervisado, es decir, una clasificación en la que se cuenta con información acerca del área de estudio, debido a que las clasificaciones generadas se basan en algoritmos propios del método seleccionado (método de máxima probabilidad), el cual es el más empleado en aplicaciones de teledetección, de acuerdo con Chuvieco (1995) [1], además de contar con conocimiento de la zona; motivo por el cual se decidió inclinarse por realizar una clasificación de esta naturaleza y no una clasificación de tipo no supervisado.

Dicha decisión se vio apoyada por factores como las firmas espectrales, en las que existió una diferenciación denotada y evidente, gracias a los gráficos de firmas espectrales generados por el complemento SCP, y principalmente por los resultados obtenidos del análisis de separabilidad (que se mencionará más adelante), cuyos resultados arrojaron que las firmas espectrales para las regiones de entrenamiento fueron muy diferenciadas, es decir, presentarán mínima confusión, o en el mejor de los casos una nula confusión entre ellas.

4.3.2. Áreas de entrenamiento

Las áreas de entrenamiento, tal y como su nombre lo indica, son regiones establecidas por el usuario, con el fin de “entrenar” al clasificador del programa utilizado por aquel. La asignación varía en cada imagen debido a la disponibilidad de datos para establecer las áreas, así como de las combinaciones de bandas que se pueden realizar por cada sensor. Dichas combinaciones son de gran utilidad para establecer de manera efectiva las áreas de entrenamiento, ya que, de realizarse una clasificación en las imágenes de entrada, no se establece ninguna combinación [14].

Se identificaron 7 categorías o macroclases, mediante las cuales se realizó la clasificación en cada una de las imágenes. Dichas macroclases fueron las siguientes:

- Vegetación primaria: corresponde a la cobertura boscosa del municipio de Cobán.
- Vegetación secundaria: corresponde a la cobertura vegetal no boscosa, referida pastos y vegetación poco densa.
- Zona urbana (urbanización): corresponde a las zonas humanas con una presencia alta de edificaciones y construcciones para distintos fines.
- Cuerpos de agua: corresponde a ríos y lagunas.
- Nubes: corresponde a la cobertura nubosa dentro de la zona de estudio.
- Sombras: corresponde a las sombras generadas por las nubes.

En el siguiente cuadro se condensan las macroclases empleadas para la generación de clasificaciones de usos de suelos.

Cuadro 5: Macroclases empleadas para la clasificación de imágenes.

Macroclase ID	Nombre de la categoría	Tipo de cobertura
1	Vegetación primaria	Forestal
2	Vegetación secundaria	Forestal
3	Zona urbana (urbanización)	No forestal
4	Otros usos de suelo	No forestal
5	Cuerpos de agua	No forestal
6	Nubes	No clasificado
7	Sombras	No clasificado

Nota: Elaboración propia.

En el caso de las nubes y sombras, dichas macroclases no fueron clasificadas ya que como tal no constituyen coberturas de suelo, sin embargo fueron consideradas por dos motivos importantes, el primero de ellos es por su presencia en las imágenes satelitales empleadas para el estudio, y el segundo, para evitar confusiones en la clasificación, como su inclusión en otras macroclases, lo cual representaría una importante fuente de error en estas.

Generación de áreas de entrenamiento y composiciones RGB

En referencia al procedimiento específico de clasificación, se hizo uso de las diversas composiciones RGB (Rojo-Verde-Azul) con el fin de apreciar de mejor manera las diversas coberturas existentes en la zona de interés, y de esa cuenta establecer áreas de entrenamiento significativas y representativas de cada cobertura. Para ello se generaron diversas combinaciones en cada una de las imágenes, buscando diferenciar lo suficiente las coberturas en la imagen de cada año.

Dichas composiciones son combinaciones específicas de bandas, con el fin de emplearlas para crear una composición de color de una imagen [5]. Tales composiciones son creadas y desplegadas por el programa, por combinación de valores espectrales de bandas individuales. Cada banda es entonces visualizada usando uno de los colores primarios (rojo, verde y azul), y de ahí la denominación de composiciones RGB [5].

Dichas composiciones RGB fueron utilizadas para la posterior generación de las áreas de entrenamiento, debido a que cierto tipo de cobertura era más clara y mejor delimitada con cierta combinación. Este procedimiento fue realizado para todas las coberturas de suelo, aunque, cabe destacar que para cierta combinación RGB una o más coberturas eran lo suficientemente distinguibles, por lo que bastaba con esta para la generación de áreas de entrenamiento de varias categorías.

A continuación se muestran, para las tres imágenes satelitales utilizadas para el estudio, las composiciones RGB utilizadas para la identificación de coberturas.

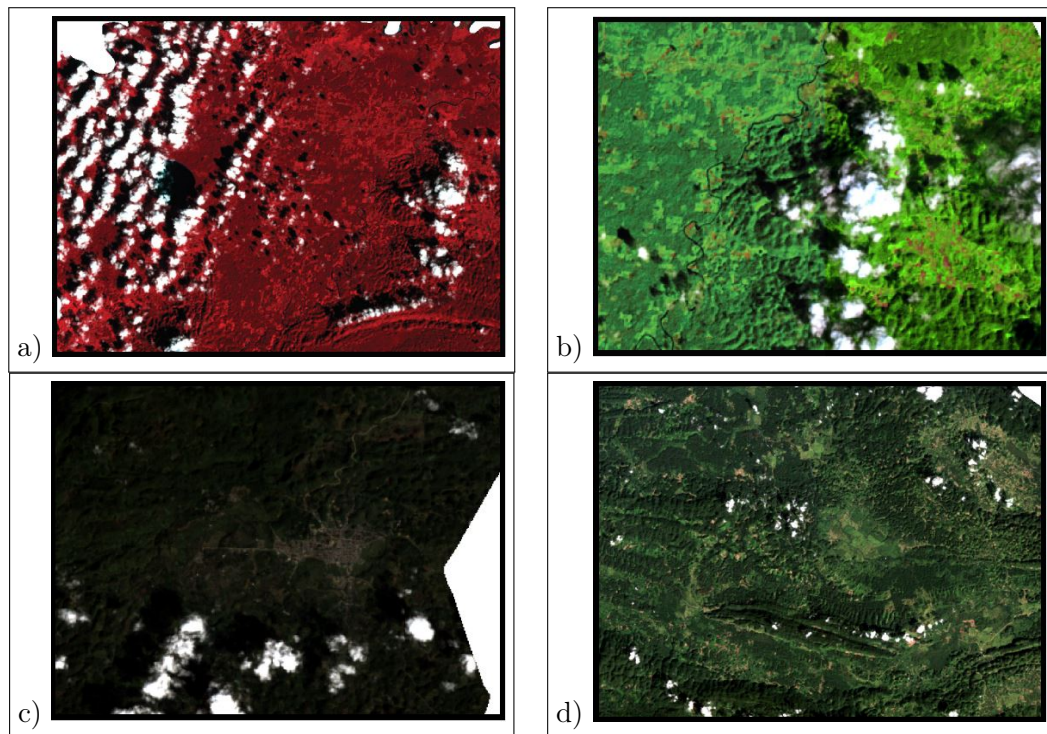


Figura 22: Composiciones RGB, año 1990: (a) Composición 4-3-2, (b) Composición 5-4-3, (c) Composición 3-2-1, (d) Composición 3-2-1.

Fuente: Elaboración propia.

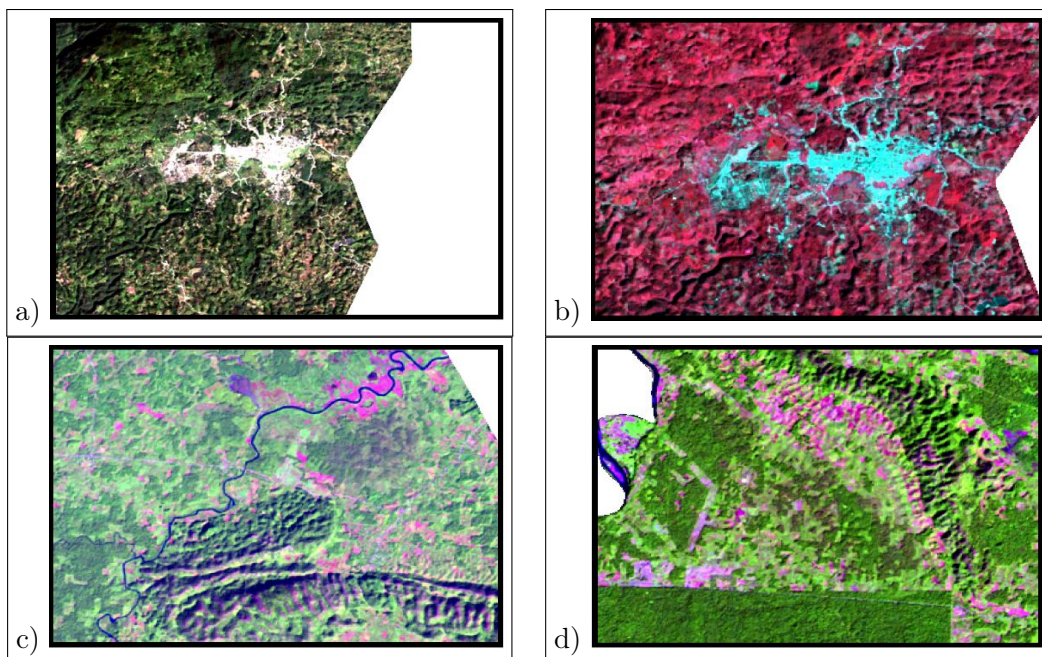


Figura 23: Composiciones RGB, año 2000: (a) Composición 3-2-1, (b) Composición 4-3-2, (c) Composición 5-4-3, (d) Composición 5-4-2.
Fuente: Elaboración propia.

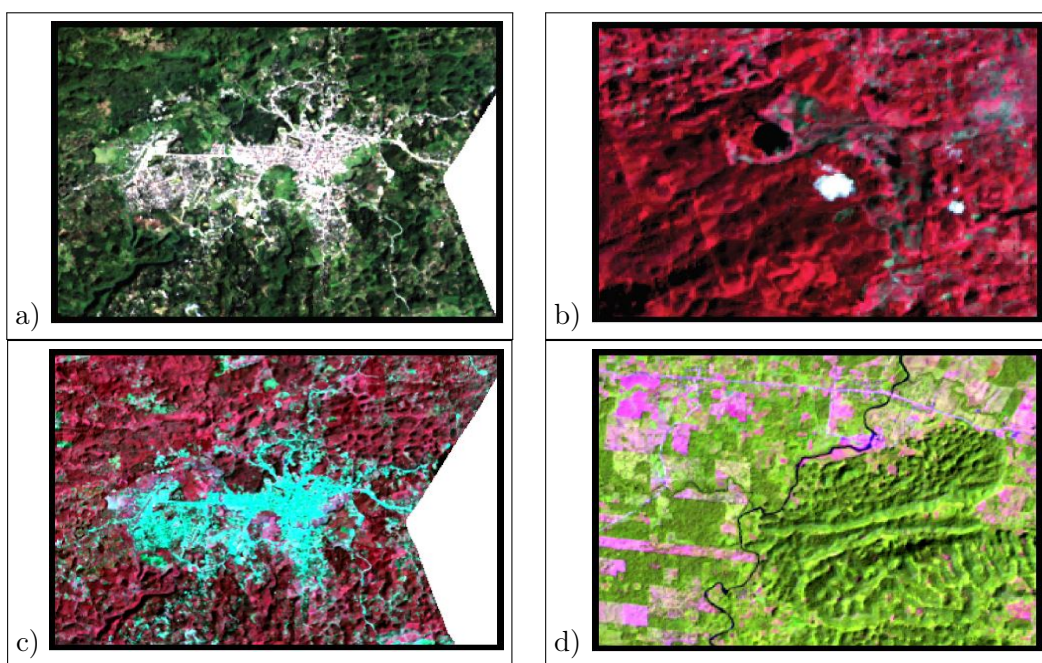


Figura 24: Composiciones RGB, año 2015: (a) Composición 3-2-1, (b) Composición 5-4-3, (c) Composición 4-3-2, (d) Composición 5-4-3.
Fuente: Elaboración propia.

En el caso de la imagen del año 1990, se utilizó la composición 4-3-2 para la identificación de las nubes en la imagen (Figura 22-a), la composición 5-4-3 fue utilizada para

la identificación de las sombras y agua, como se aprecia en la Figura 22-b. Para el caso de la identificación de la zona urbanizada como de la vegetación, y usos distintos a los de urbanización fue utilizada la composición 3-2-1 (Figura 22-c y 22-d).

Para la imagen del año 2000, se utilizó la composición 3-2-1 para la identificación de vegetación en la imagen (Figura 23-a), la composición 4-3-2 para la identificación de las zonas urbanizadas, como se aprecia en la Figura 23-b. Para el caso de la identificación de cuerpos de agua, fue utilizada la composición 5-4-3 (Figura 23-c), mientras que la composición 5-4-2 (Figura 23-d) fue utilizada para identificación de cobertura de suelo no urbanizadas. Cabe resaltar que para el caso de esta imagen, las macroclases nubes y sombras no se consideraron, ya que la imagen es muy limpia y no cuenta con presencia de nubes.

En lo concerniente a la imagen del año 2015, la identificación para usos de suelo no urbanizados se realizó utilizando la composición 3-2-1 (Figura 24-a). En el caso de las categorías de zonas urbanizadas se utilizó la composición 4-3-2 (Figura 24-c), y para nubes y sombras se utilizó las composición 5-4-3 (Figura 24-b). La identificación de cuerpos de agua como de la vegetación fue realizada a través del empleo la composición 5-4-3 (Figura 22-d).

Tamaño de las áreas de entrenamiento

En cuanto al tamaño de las áreas de entrenamiento, expresado en términos de píxeles sobre la imagen, estas deben de ser de tamaño $m+1$, donde m es el número de bandas que integran el análisis [14]. Para el presente estudio, se tienen tres imágenes satelitales con 3 sensores diferentes, siendo el LANDSAT 5 para el año 1990, con seis bandas, LANDSAT 7 para el año 2000 con seis bandas y por último el LANDSAT 8 para el año 2015, con un total de seis bandas, por lo que, el número de píxeles mínimos es de 7 para todas las imágenes empleadas para el estudio en cuestión.

Cuadro 6: Dimensiones de las áreas de entrenamiento expresada en píxeles.

Macroclase	Años de estudio		
	L5 TM 1990	L7 ETM 2000	L8 OLI 2015
1. Vegetación primaria	838	2628	150
2. Vegetación secundaria	13	1213	130
3. Zona urbana (urbanización)	12	274	34
4. Otros usos de suelo	54	878	363
5. Cuerpos de agua	240	2011	11
6. Nubes	4370	N/A	322
7. Sombras	496	N/A	456

Nota: Elaboración propia.

En el caso de la imagen satelital del año 2000, tal como se muestra en el cuadro anterior, no se establecieron áreas de entrenamiento tanto para nubes como sombras, ya que no hubo presencia de estas en la imagen, por lo que no aplican dichas categorías, y por este motivo la notación N/A.

4.3.3. Análisis de separabilidad

El análisis espectral en áreas de entrenamiento y su verificación es de gran importancia, ya que de una buena separabilidad dependerá en gran medida el éxito de la clasificación. Dicha separabilidad es abordada a través del método Jeffries-Matusita, (cuyos valores oscilan entre 0 y 2) en donde valores mayores a 1.9 indican buena separabilidad, mientras que valores menores a 1.0 indican un cambio en las áreas de interés o la agrupación de categorías, mientras que valores intermedios, entre 1.0 y 1.9 sugieren que la agrupación o cambio de áreas es opcional [14]. En este caso, la separabilidad fue determinada a través del complemento SCP del software utilizado para la realización de la clasificación, QGIS.

A continuación se muestran los valores de separabilidad para las tres imágenes utilizadas para el análisis multitemporal. Se observa que los valores se encuentran entre 1.92 y 1.99, por lo que puede decirse que para las áreas de entrenamiento generadas para cada macroclase establecida la separabilidad es buena, lo que significa que las firmas son lo suficientemente distintas y el riesgo de confusión entre ellas es muy reducido o nulo.

Cuadro 7: Separabilidad espectral de los campos de clasificación.

Año de imagen	Macroclase	Valor
1990	1. Vegetación primaria	1.92
	2. Vegetación secundaria	1.99
	3. Zona urbana	1.99
	4. Otros usos de suelo	1.99
	5. Cuerpos de agua	1.99
	6. Nubes	1.99
	7. Sombras	1.99
2000	1. Vegetación primaria	1.97
	2. Vegetación secundaria	1.97
	3. Zona urbana	1.98
	4. Otros usos de suelo	1.98
	5. Cuerpos de agua	1.99
	6. Nubes	N/A
	7. Sombras	N/A
2015	1. Vegetación primaria	1.99
	2. Vegetación secundaria	1.99
	3. Zona urbana	1.99
	4. Otros usos de suelo	1.99
	5. Cuerpos de agua	1.99
	6. Nubes	1.99
	7. Sombras	1.99

Nota: Elaboración propia.

Como puede observarse en el Cuadro 7, para el caso de las categorías o macroclases nubes y sombras de la imagen del año 2000 no aplican, por lo que no presentan valor de separabilidad espectral.

El análisis de separabilidad permite medir la diferencia existente entre macroclases, de manera que pueda determinarse, de forma numérica, si las firmas son lo suficientemente diferenciables, y por ende adecuadas para el estudio, sin embargo, la naturaleza y comportamiento de estas puede estudiarse también desde el punto de vista gráfico, que permite observar el comportamiento entre firmas de acuerdo a las longitudes de onda del sensor del cual se obtienen las imágenes. En ambos casos, tanto los valores de separabilidad, así como las gráficas de firmas espectrales son generadas y proporcionadas por el software.

Se observa que el comportamiento espectral de las áreas de entrenamiento es muy similar por cobertura para cada año de estudio, lo que indica que la asignación de áreas se realizó de manera adecuada, ya que se observa una tendencia en el comportamiento de cada macroclase, tal y como se observa en la Figura 25. (Nota: las firmas espectrales presentan el mismo orden al mostrado en el Cuadro 5.)

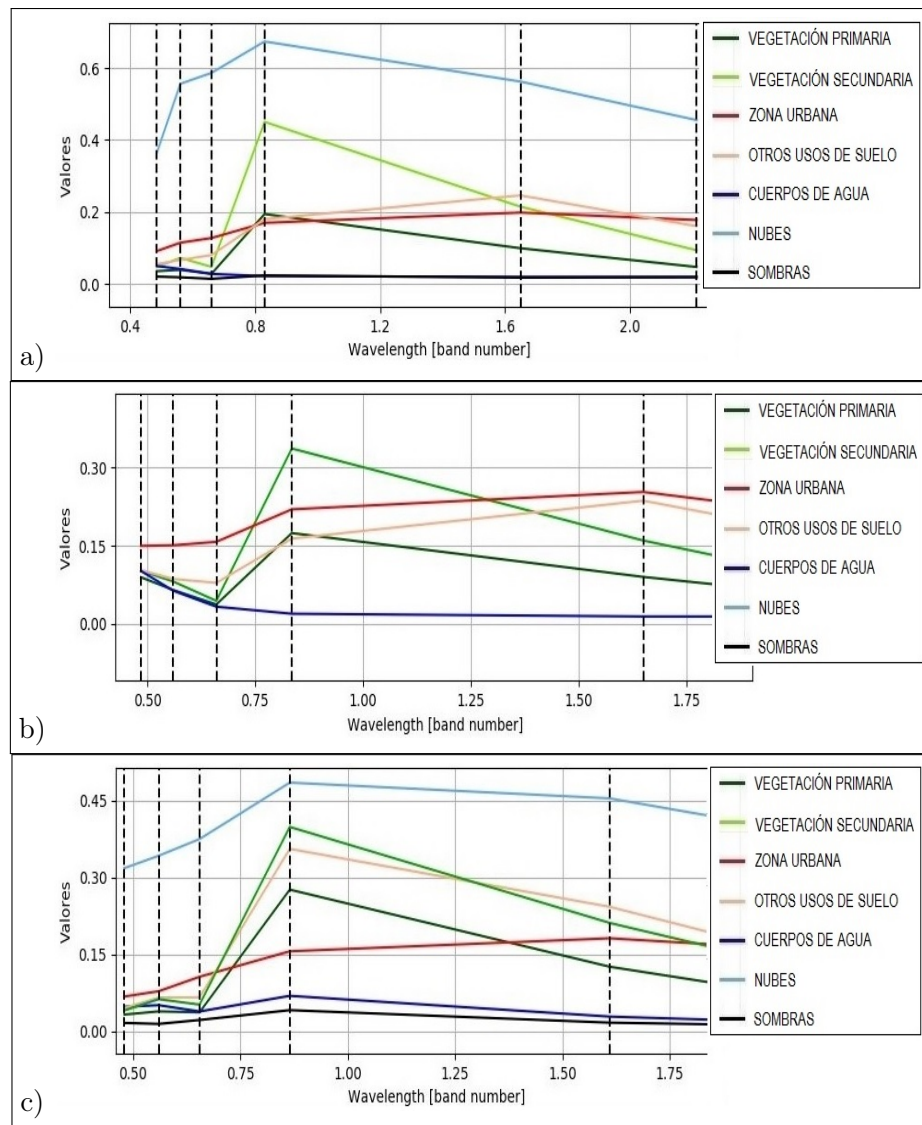


Figura 25: Firmas espectrales de las áreas de entrenamiento, calculados en QGIS 3.6:
(a) Año 1990, (b) Año 2000, (c) Año 2015.

Fuente: Elaboración propia.

4.4. Validación de la clasificación

4.4.1. Diseño y tamaño de la muestra

Para llevar a cabo la validación de las clasificaciones realizadas se procedió a generar una malla de puntos aleatorios dentro del área de estudio. Para dicha tarea se hizo uso de la herramienta de creación de puntos aleatorios dentro de polígonos, que se encuentra también disponible en el software QGIS 3.6, con el fin de garantizar muestras representativas en cada clase de cobertura considerada.

Para el cálculo del tamaño de la muestra se empleó la Ecuación 5:

$$n = \frac{z^2 \cdot p \cdot q}{E^2}$$

donde:

- z = valor para una probabilidad de 95 %.
- p = 0.90 (porcentaje de aciertos estimados)
- q = 0.10 (porcentaje de errores estimados)
- E = se adoptó un error de muestro del 5 %.

$$n = \frac{(1.96)^2(0.90)(0.10)}{(5)^2}$$
$$n = 138$$

Según este resultado, se establecieron 138 puntos para la validación del análisis de cada una de las imágenes satelitales empleadas.

La validación de los resultados se realizó comparando cada uno de los puntos con los dos datos con los que se cuentan para cada uno de estos: la cobertura en la fotografía y la cobertura en la clasificación generada por el software.

De esta cuenta se analizó la concordancia entre la clasificación y las fotografías satelitales de cada punto, tomando a las fotografías como referencia para esta tarea. Este fue el procedimiento seguido por medio del cual fueron construidas las matrices de confusión para cada año de estudio, por lo que se tienen en total 3 matrices de confusión en las que se muestran, valga la redundancia, las “confusiones” que se dieron en la clasificación realizada por el software, además de arrojar y mostrar el grado de exactitud de esta.

En cuanto a la malla de puntos de validación, se trabajaron tres mallas distintas, una para cada imagen satelital, con la herramienta de creación de puntos aleatorios del programa QGIS. Esto se hizo con el fin de garantizar la aleatoriedad e independencia de los resultados de clasificación entre imágenes.

A manera de ejemplo se presenta el resultado de una de las mallas de puntos aleatorios generadas, siendo la de imagen, la utilizada para la validación de la clasificación de la imagen del año 1990.

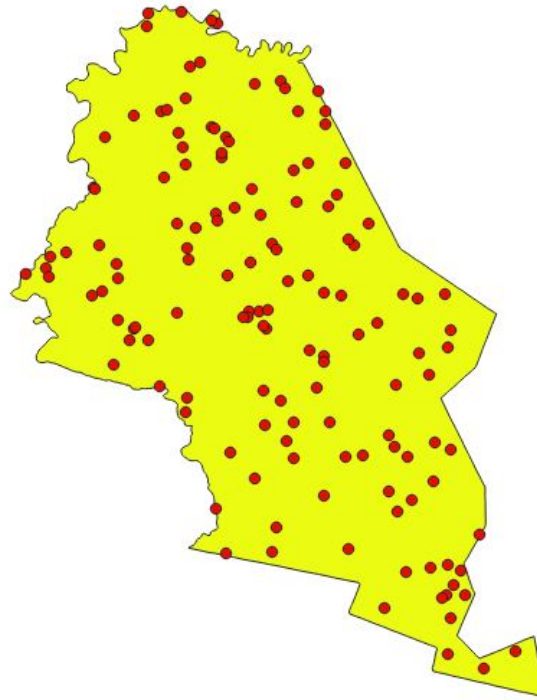


Figura 26: Malla de puntos de validación de clasificación para la imagen del año 1990.
Fuente: Elaboración propia.

Nota: Las tablas de puntos de validación para las tres clasificaciones se presentan en los anexos.

4.4.2. Construcción de las matrices de confusión

Posterior a la generación de la malla de puntos, se procedió a la construcción de las matrices de confusión, a través de la cuantificación de tanto las concordancias entre los componentes imagen satelital-clasificación, como de las discrepancias entre estos. A manera de ejemplo se muestra la matriz para la imagen del año 1990, en donde se plasman las relaciones antes mencionadas.

El procedimiento para la elaboración de cada una de las matrices se describe a continuación:

1. Con la malla de puntos aleatorios ya generada, se procedió al registro de la cuantificación de los puntos y de las categorías a las cuales pertenecían en la imagen, en otras palabras, se determinó cuántos puntos de la malla, sobrepuesta a la imagen, pertenecen a vegetación, urbanización, nubes, etc.
2. Realizada la cuantificación sobre la imagen, se procedió a contrastar dichos resultados con la clasificación realizada por el software, cuantificando cuantitativa y cualitativamente las concordancias, y las discrepancias, es decir, cuantificar cuántos puntos clasificados como “x” categoría a partir de la imagen, presentan esa misma categoría

en la clasificación del software; y en los casos de discrepancia, cuantificar cuántos puntos de la categoría “x” (clasificados así a partir de la imagen) no fueron clasificados en dicha categoría, y registrar en qué categorías fueron clasificados.

3. Registrada dicha información, se procedió a la construcción de las matrices, introduciendo la información en las respectivas casillas de estas. La lógica que rige la construcción de las matrices de confusión es la siguiente:

- Por ejemplo, para la macroclase o categoría 1 (fila 1 de la matriz que se muestra en el Cuadro 8, se introduce el valor marginal (en la columna “Total”). Posteriormente se introducen los valores de los puntos correctamente clasificados y de aquellos que mostraron confusión. Este procedimiento es realizado para todas las filas.
- A continuación se calculan los totales para cada columna. .

4. Seguidamente se realiza el cálculo de las exactitudes tanto del usuario como del productor. Esto se llevó a cabo determinando la razón entre los valores marginales de la tabla (identificados como “Total”) para cada fila y columna respectivamente, y los valores de la diagonal principal en dicha fila/columna. A manera de ejemplo de cálculo, de la matriz del Cuadro 8, la exactitud de la categoría o macroclase 1 (primera fila), está dada por:

$$Ex.U. = \frac{58}{67} \cdot 100 \%$$

$$Ex.U. = 86.6 \%$$

Donde el numerador corresponde al valor de la diagonal principal en esta fila y el denominador es el valor marginal en esa misma fila. Este procedimiento se realiza de manera sucesiva para todas las filas y columnas de la matriz, con la diferencia de que para las columnas este cálculo es entendido como el error del productor.

5. Se procede al cálculo de la exactitud global de la matriz, mediante la razón entre la suma de los valores de la diagonal principal y el número de puntos de muestreo. En el caso del Cuadro 8, está dada por la razón:

$$E_{Global} = \frac{58 + 30 + 0 + 2 + 2 + 18 + 4}{138} \cdot 100 \%$$

$$E_{Global} = 82.6 \%$$

Donde los elementos del numerador corresponden a los valores de la diagonal principal de la matriz de confusión (Cuadro 8) y el denominador corresponde al total de los puntos empleados para la validación.

6. Por último se calculan los errores de comisión y omisión. Dichos errores fueron obtenidos al restarle a la unidad los resultados de las exactitudes de usuario y productor. Para la macroclase 1 (fila 1), se tiene entonces:

$$Ex.U. = 1 - 0.866 \cdot 100 \%$$

$$Ex.U. = 13.4 \%$$

Y así sucesivamente para todas las filas y columnas de la matriz de confusión.

Cuadro 8: Matriz de confusión, año 1990, expresada en número de puntos.

	Cat.	Categorías						Total	Ex.U. (%)	E.C. (%)	
		1	2	3	4	5	6				7
Clasificación	1	58	9	0	0	0	0	0	67	86.6	13.4
	2	11	30	0	0	0	0	0	41	73.2	26.8
	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0.00	0.00
	4	0	0	0	2	0	0	0	2	100.0	0.0
	5	0	1	0	0	2	0	0	3	66.7	33.4
	6	0	1	0	0	0	18	0	19	94.7	5.3
	7	2	0	0	0	0	0	4	6	66.7	33.3
	Total	71	41	0	2	2	18	4	138	82.6%	
Ex.P. (%)	81.7	73.2	0.0	100.0	100.0	100.0	100.0				
E.O. (%)	18.3	26.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0				

Descripción de categorías: 1. Vegetación primaria 2. Vegetación secundaria 3. Zona urbana 4. Otros usos de suelo 5. Cuerpos de agua 6. Nubes 7. Sombras. Nota: Elaboración propia.

El procedimiento anteriormente descrito fue el realizado para las tres matrices de confusión para los años de estudio.

4.4.3. Cálculo de estadísticos de la matriz de confusión

Tomando como base la matriz de confusión del año 1990, los cálculos para el intervalo de exactitud del mapa se muestran a continuación.

Se calcula, por medio de la Ecuación 8, el valor esperado, el cual está dado por:

$$ES = 1.96 \cdot \sqrt{\frac{(82.60) \cdot (17.40)}{138}}$$

$$ES = 6.32$$

Según este resultado, y utilizando la Ecuación 7 se tiene entonces el intervalo:

$$F = 82.60 \pm 6.32$$

Es decir, con un 95% de probabilidad, puede afirmarse que la fiabilidad real se encuentra entre 76.28 y 88.92%.

En lo referido al índice Kappa asociado de la matriz, el procedimiento para su cálculo es el dado por la Ecuación 13, como se muestra a continuación.

$$\kappa = \frac{(114 \cdot 138) - [(67 \cdot 71) + (41 \cdot 41) + (2 \cdot 2) + (2 \cdot 3) + (19 \cdot 18) + (6 \cdot 4)]}{(138)^2 - [(67 \cdot 71) + (41 \cdot 41) + (2 \cdot 2) + (2 \cdot 3) + (19 \cdot 18) + (6 \cdot 4)]}$$

$$\kappa = 0.73$$

Al igual que con la exactitud global de la matriz, puede calcularse el intervalo en el cual se encuentra el índice Kappa para la matriz en cuestión, siguiendo el mismo procedimiento

que el utilizado para la exactitud global; con el fin de observar la dispersión o variabilidad del índice Kappa y principalmente, para comparar índices Kappa de imágenes diferentes, que es el caso que ocupa el presente estudio.

$$ES_{\kappa} = 1.96 \cdot \sqrt{\frac{(73) \cdot (27)}{138}}$$
$$ES_{\kappa} = 7.41$$

Procedimientos idénticos fueron realizados para las matrices de confusión de los años 2000 y 2015.

Resultados y discusión

Una vez realizadas las clasificaciones en los tres diferentes años que conforman el estudio, se calcularon las matrices de confusión por año, obteniendo los parámetros y medidas numéricas de exactitud en el anterior capítulo desarrolladas, con el fin de validar cada una de las clasificaciones realizadas.

5.1. Resultados para el año 1990

Para el caso de la matriz de confusión del año 1990 (que se utilizó anteriormente), se obtuvo una exactitud global de aproximadamente 82.6 %, y un intervalo de fiabilidad ubicado entre 76.28 y 88.92 % real para una probabilidad del 95 %, lo cual es un valor aceptable de confiabilidad real de la matriz.

En lo que respecta a las exactitudes de usuario y productor, debe comentarse que tuvieron una variabilidad considerable, desde un 66 a 100 % en el caso del usuario, y de un 73 al 100 % de exactitud para el productor. En el caso de la exactitud del usuario, las macroclases con menor exactitud fueron las correspondientes a los cuerpos de agua y sombras, que presentaron una gran confusión con otras macroclases; en el caso de los cuerpos de agua presentaron confusión con vegetación secundaria, mientras que las sombras presentaron confusión con vegetación primaria. Pese a ello, puede argumentarse que los bajos porcentajes de exactitud son debidos a la cantidad de puntos que se ubicaron en dichas macroclases. De tenerse una mayor cantidad de puntos de verificación la cantidad de puntos para dichas macroclases se vería aumentada, y por ende, los porcentajes podrían sufrir modificaciones considerables, ya que para el caso de los cuerpos de agua solo se tuvieron 3 puntos en dicha macroclase, y un solo punto de conflicto o confusión afecta de manera drástica la exactitud del usuario. Dicho comportamiento es el mismo para el caso de la macroclase de sombras, que tuvo 6 puntos de verificación clasificados como tal, presentando confusión 2 de los 6

puntos, disminuyendo de manera drástica la exactitud para esta.

Cuadro 9: Matriz de confusión, año 1990, expresada en número de puntos.

	Cat.	Categorías							Total	Ex.U. (%)	E.C. (%)
		1	2	3	4	5	6	7			
Clasificación	1	58	9	0	0	0	0	0	67	86.6	13.4
	2	11	30	0	0	0	0	0	41	73.2	26.8
	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0.00	0.00
	4	0	0	0	2	0	0	0	2	100.0	0.0
	5	0	1	0	0	2	0	0	3	66.7	33.4
	6	0	1	0	0	0	18	0	19	94.7	5.3
	7	2	0	0	0	0	0	4	6	66.7	33.3
	Total	71	41	0	2	2	18	4	138	82.6%	
Ex.P. (%)	81.7	73.2	0.0	100.0	100.0	100.0	100.0				
E.O. (%)	18.3	26.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0				

Descripción de categorías: 1. Vegetación primaria 2. Vegetación secundaria 3. Zona urbana 4. Otros usos de suelo 5. Cuerpos de agua 6. Nubes 7. Sombras. Nota: Elaboración propia.

En lo que respecta a los errores de omisión, solo se cuentan para dos de las 7 categorías, presentando 5 de estas ausencia de errores de omisión, mientras que para las 2 macroclases restantes se obtuvieron errores que oscilaron entre 18 y 26 %, que es un rango significativo; siendo dichas macroclases las relacionadas a cobertura vegetal (vegetación primaria y secundaria).

Los errores de comisión para estas macroclases, basado en los puntos de verificación indican que hay regiones en la clasificación final que no fueron bien clasificadas y que se omitieron en la clasificación hecha por el software. En cuanto a los errores de comisión, el mayor error correspondió a un 33 %, para los cuerpos de agua y sombras, que puede entenderse como una deficiencia en la delimitación de dichas macroclases.

En cuanto a urbanización se refiere, para el año 1990 no se tuvieron puntos de verificación ubicados en este tipo de cobertura.

Ahora bien, haciendo referencia al índice Kappa de la matriz, que es el principal índice de validación para el presente estudio, se obtuvo un valor de 0.73, que, de acuerdo con el cuadro 3, se ubica en el rango "considerable", por lo que la clasificación realizada para este año puede considerarse válida, y aceptable.

Como producto de la clasificación, se obtuvo entonces la extensión de la zona urbanizada para el año 1990 en el municipio de Cobán, la cual corresponde a una superficie de 3.16 km²; ubicándose la mayor parte de esta área en la ciudad de Cobán, que es la región que se muestra en la figura 28 y sobre la cual se hizo más énfasis.

Cabe denotar que no se discriminó el resto del territorio, ya que el área anteriormente mencionada corresponde al área urbana presente en todo el municipio, pero se mostrarán los mapas de la ciudad de Cobán por ser el mayor núcleo urbano de la zona, aunque, si se desea consultar la distribución urbana del municipio entero pueden consultarse los anexos, donde se encuentran los mapas de la zona completa para los tres años estudiados.

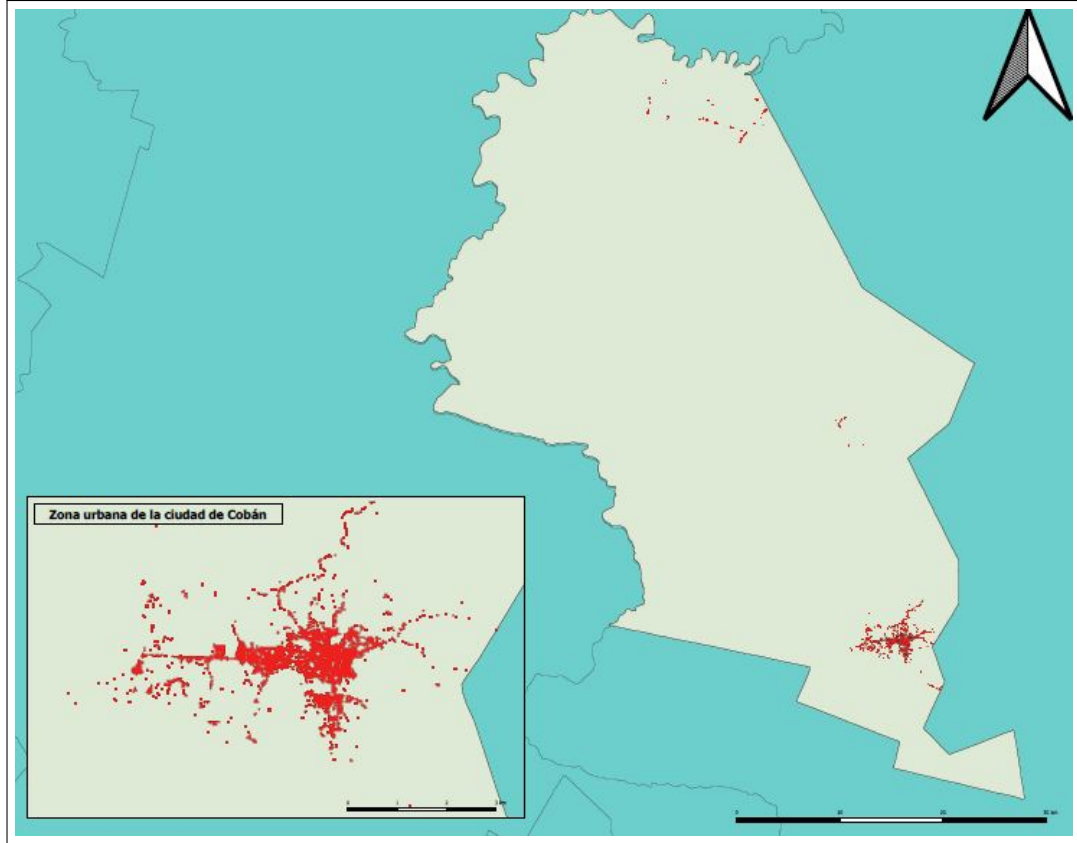


Figura 27: Zona urbana del municipio de Cobán hacia el año 1990.
Fuente: Elaboración propia.

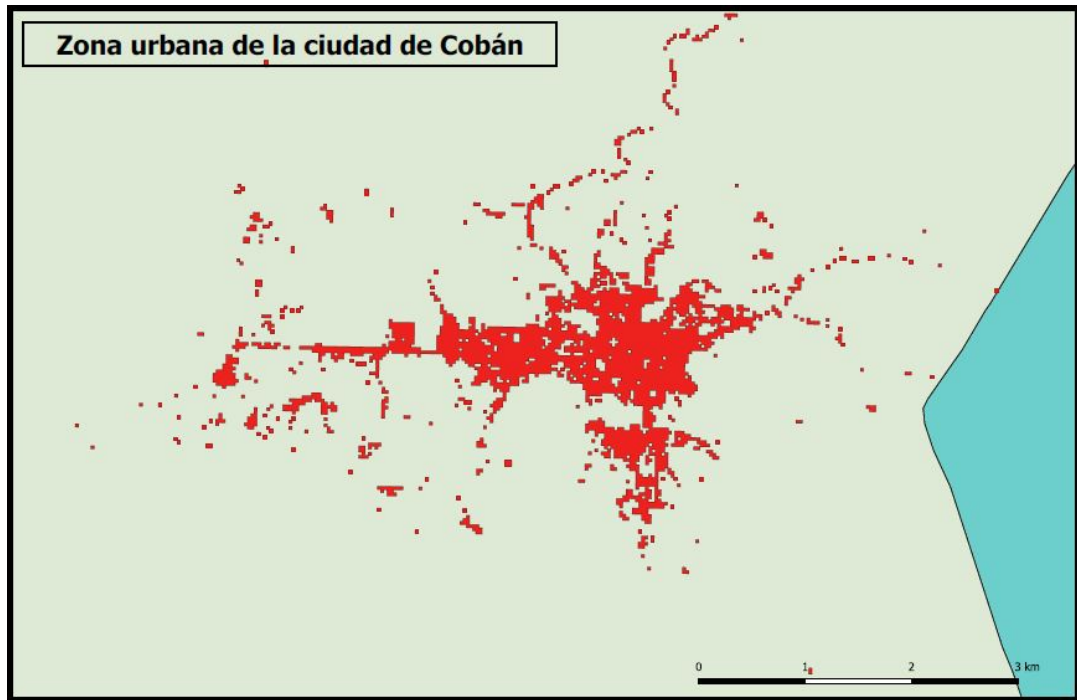


Figura 28: Zona urbana de la ciudad de Cobán, de la clasificación de uso de suelo para el año 1990.
Fuente: Elaboración propia.

A nivel municipio, puede observarse que la mayor parte de la cobertura urbana hacia el año 1990 se concentraba en la parte sur de este, en la ciudad de Cobán (Figura 27), sin embargo existían pequeños núcleos urbanos en la parte norte y centro-este del municipio, aunque casi despreciables en términos de superficie.

A nivel de la Ciudad de Cobán (Figura 28), puede observarse que la zona urbana se encuentra bien delimitada y que los núcleos periféricos se encuentran muy esparcidos alrededor de la ciudad de Cobán, que presenta en su parte este una menor presencia urbana, siendo la parte oeste la más desarrollada y ocupada para fines urbanos.

5.2. Resultados para el año 2000

Para el caso de la clasificación del año 2000 se obtuvo una exactitud global del 94.90 %, siendo la exactitud más alta alcanzada entre las tres matrices de confusión generadas, con 121 puntos clasificados correctamente de 138 puntos de verificación (Cuadro 10). El intervalo entonces, de fiabilidad real, para una probabilidad del 95 %, para la matriz de confusión se encuentra entre 91.23 y 98.57 %.

Asimismo se tuvo un índice Kappa de 0.80, por lo que la clasificación realizada en este año es bastante exacta, siendo muy cercana a una clasificación casi perfecta.

Cabe indicar que la ausencia de nubes y sombras en la imagen propició que no se generaran áreas de entrenamiento para dichas macroclases; lo que también explica el hecho de que en la matriz de confusión no se presentaran puntos de verificación para estas macroclases. La precisión del usuario presentó valores mayores a 85 %, presentándose los principales conflictos entre vegetación secundaria y primaria, en donde 13 puntos fueron mal clasificados.

En relación a la precisión del productor, esta presentó valores superiores a 90 %, a excepción de la vegetación secundaria, que presentó confusiones con otros usos de suelo y vegetación primaria.

Cuadro 10: Matriz de confusión, año 2000, expresada en número de puntos.

	Cat.	Categorías							Total	Ex.U. (%)	E.C. (%)
		1	2	3	4	5	6	7			
Clasificación	1	55	8	0	1	0	0	0	64	85.9	14.1
	2	5	46	0	0	0	0	0	51	90.2	9.8
	3	0	0	1	0	0	0	0	1	100.0	0.0
	4	0	3	0	18	0	0	0	21	85.7	14.3
	5	0	0	0	0	1	0	0	1	100.0	0.0
	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0.0	0.0
	7	0	0	0	0	0	0	0	0	0.0	0.0
	Total	60	57	1	19	1	0	0	138	94.9%	
Ex.P. (%)	91.7	80.7	100.0	94.7	100.0	0.0	0.0				
E.O. (%)	8.3	19.3	0.0	5.3	0.0	0.0	0.0				

Descripción de categorías: 1. Vegetación primaria 2. Vegetación secundaria 3. Zona urbana 4. Otros usos de suelo 5. Cuerpos de agua 6. Nubes 7. Sombras. Nota: Elaboración propia.

En lo que respecta a la extensión de la zona urbanizada del año 2000, se presentó una diferencia notable con respecto al año 1990; siendo la extensión de la zona urbanizada para aquel año de 8.05 km², es decir, un crecimiento de aproximadamente 4.88 km² en un período de 10 años, lo que equivale a un crecimiento de más de 2.5 veces la extensión para el año de 1990, tal y como se muestra en el Cuadro 13.

En cuanto al comportamiento de la cobertura urbana en el municipio, se presentó un crecimiento notable con respecto al año 1990. Puede observarse que la parte norte, que para el año 1990 presentaba una zona urbana mínima, presentó un crecimiento tanto en la parte este como oeste. Sin embargo, las diferencias más notables se presentan en la parte centro del municipio (Figura 29), en donde se observa un crecimiento elevado, y que sigue un comportamiento "lineal", que cabe destacar, es debido a la presencia de vías terrestres, por lo que puede decirse que el aspecto económico (vinculado con carreteras y vías de transporte) influyó significativamente en el comportamiento de la cobertura urbana en el transcurso de la década de los años 1990.

Numéricamente, en términos de tasa de crecimiento en el municipio, para el período comprendido entre los años 1990 y 2000 se tuvo un aumento anual de 0.48 km² (Cuadro 13).

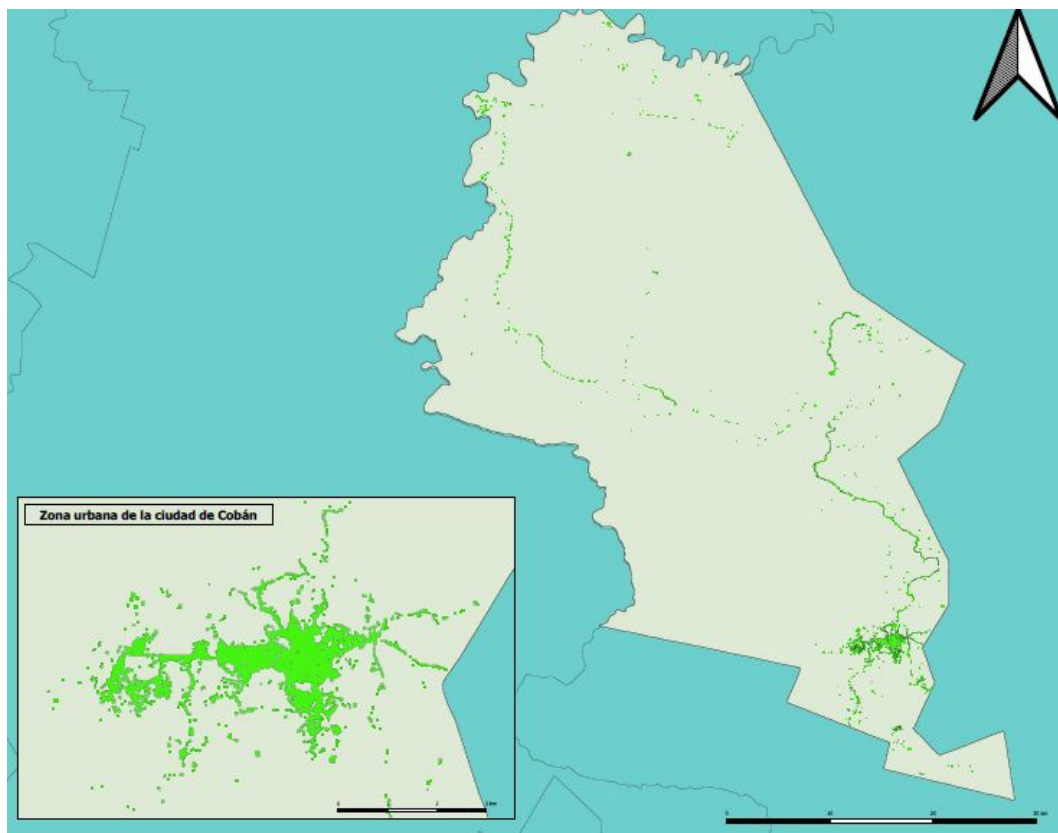


Figura 29: Zona urbana del municipio de Cobán hacia el año 2000.

Fuente: Elaboración propia.

A nivel de la ciudad de Cobán, se aprecia claramente que la zona oeste de la ciudad de Cobán es la que mayor cambio presentó (Figura 30), en donde los núcleos, que para el año 1990 eran esporádicos, para el año 2000 eran zonas urbanas plenamente establecidas. Sin

embargo, la zona este no fue la única que presentó cambio, ya que también puede apreciarse que en la parte sur se produjo un crecimiento significativo, y que ahora dicha región dejó de ser zona urbana periférica para ser parte de la ciudad de Cobán.

Gráficamente, puede observarse un crecimiento significativo para el año 2000 (Figura 30), en comparación con el año 1990 (Figura 28).

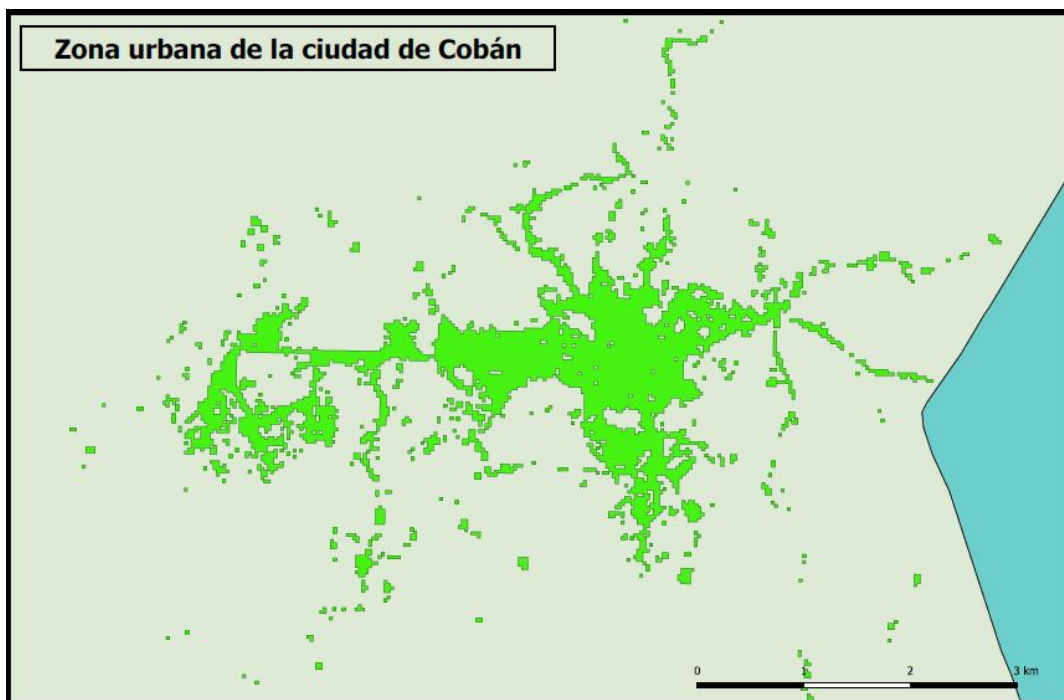


Figura 30: Zona urbana de la ciudad de Cobán, de la clasificación de uso de suelo para el año 2000. Fuente: Elaboración propia.

5.3. Resultados para el año 2015

En cuanto a la matriz de confusión del año 2015, la estimación de la exactitud global fue 85.50 %, encontrándose la exactitud real alcanzada por la clasificación entre 79.63 y 91.38 % para un 95 % de confianza, de manera que la clasificación hecha para este año puede considerarse fiable, ya que aun la estimación más pesimista de la fiabilidad roza el 80 %.

El índice Kappa para la clasificación del año 2015 fue de 0.77, el cual es un valor menos optimista que el arrojado para la exactitud de la matriz de confusión.

Los principales problemas observados en la matriz de confusión corresponden a confusiones para las categorías de vegetación primaria y otros usos de suelo. Para la categoría de vegetación primaria se alcanzó un 88 % de exactitud de usuario, mientras que para la categoría de otros usos de suelo dicha exactitud solo alcanzó el 61 %, lo que muestra que la clasificación fue deficiente para estas coberturas.

Los errores de omisión fueron igualmente muy variables y altos, principalmente para la cobertura de sombras, si bien es cierto no pueden hacerse conclusiones muy rigurosas acerca

de dicho valores debido a la escasa representación en los puntos de verificación.

Los errores de omisión muestran que para la vegetación secundaria un número considerable de puntos no fueron clasificados como tal, traduciéndose en un error del 25 %, siendo este el más alto del que se puede comentar, porque como ya se dijo, no se pueden hacer valoraciones tan rigurosas para el caso de las sombras, que presentaron muy pocos puntos de verificación.

Lastimosamente, para las coberturas de nubes y cuerpos de agua no se tuvieron puntos de validación en dichas categorías, por lo que no pueden determinarse tanto exactitudes como errores para dichas coberturas.

Cuadro 11: Matriz de confusión, año 2015, expresada en número de puntos.

	Cat.	Categorías							Total	Ex.U. (%)	E.C. (%)
		1	2	3	4	5	6	7			
Clasificación	1	59	8	0	0	0	0	2	69	88.1	11.9
	2	0	44	0	3	0	0	0	47	93.6	6.4
	3	0	0	2	0	0	0	0	2	100.0	0.0
	4	0	7	0	11	0	0	0	18	61.1	38.9
	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0.00	0.00
	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0.0	0.0
	7	0	0	0	0	0	0	2	2	100.0	0.00
	Total		59	59	2	14	0	0	4	138	85.5 %
Ex.P. (%)		100.0	74.6	100.0	78.6	0.0	0.0	50.0			
E.O. (%)		0.0	25.4	0.0	21.4	0.0	0.0	50.0			

Descripción de categorías: 1. Vegetación primaria 2. Vegetación secundaria 3. Zona urbana 4. Otros usos de suelo 5. Cuerpos de agua 6. Nubes 7. Sombras. Nota: Elaboración propia.

En lo que se refiere a la extensión de urbanización, existe una enorme diferencia entre los años 2000 y 1990. Solo en el período comprendido entre los años 2000 y 2015 se produjo un crecimiento de más de 9.80 km², equivalentes a más de 2.2 veces el área urbanizada para el año 2000, con una tasa de crecimiento de aproximadamente 0.66 km² (Cuadro 13).

Tomando ahora el período de 1990 a 2015, los datos son aún más drásticos, ya que entre dichos años se produjo un crecimiento mayor a 14.50 km², significando un aumento de la zona urbana del municipio de Cobán de más de 5.6 veces su extensión para el año de 1990, con una tasa de crecimiento de aproximadamente 0.59 km².

Gráficamente, a nivel global se observa un incremento significativo de la cobertura urbana en el municipio, siguiendo con la tendencia observada hacia el año 2000, con la diferencia de que los núcleos urbanos que en ese entonces empezaban a conformarse, para el año 2015 ya se encuentran consolidados y con una expansión considerable (Figura 31). Puede observarse que la región central de la zona urbana creció notablemente, expandiéndose a otros puntos. De igual manera la zona norte presentó un crecimiento destacable, que presenta un comportamiento "lineal" que puede aducirse, es debido a la presencia de una carretera en esa zona, desarrollándose la cobertura urbana en esa región a lo largo de esta. En lo referido a la zona sur, se observa una expansión dramática producida fuera de la ciudad de Cobán.

Haciendo referencia únicamente a la ciudad, se observa que la parte sur y oeste presenta-

ron los crecimientos visualmente más significativos, así como la aparición de nuevos núcleos urbanos esparcidos alrededor de la ciudad, principalmente en la región oeste y sur (Figura 32).

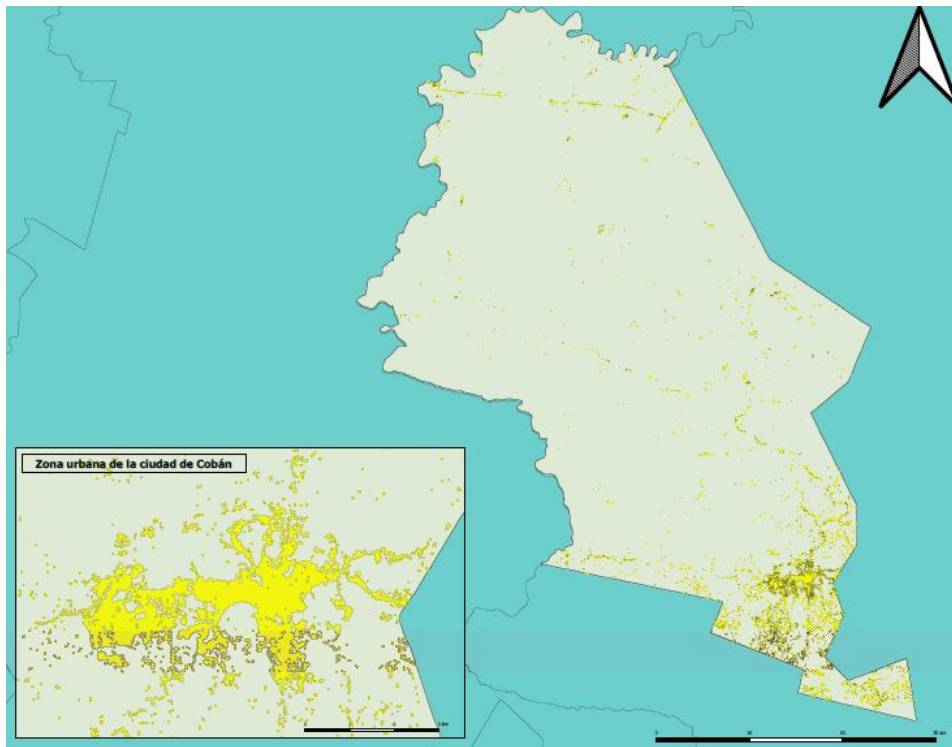


Figura 31: Zona urbana del municipio de Cobán hacia el año 2015.
Fuente: Elaboración propia.

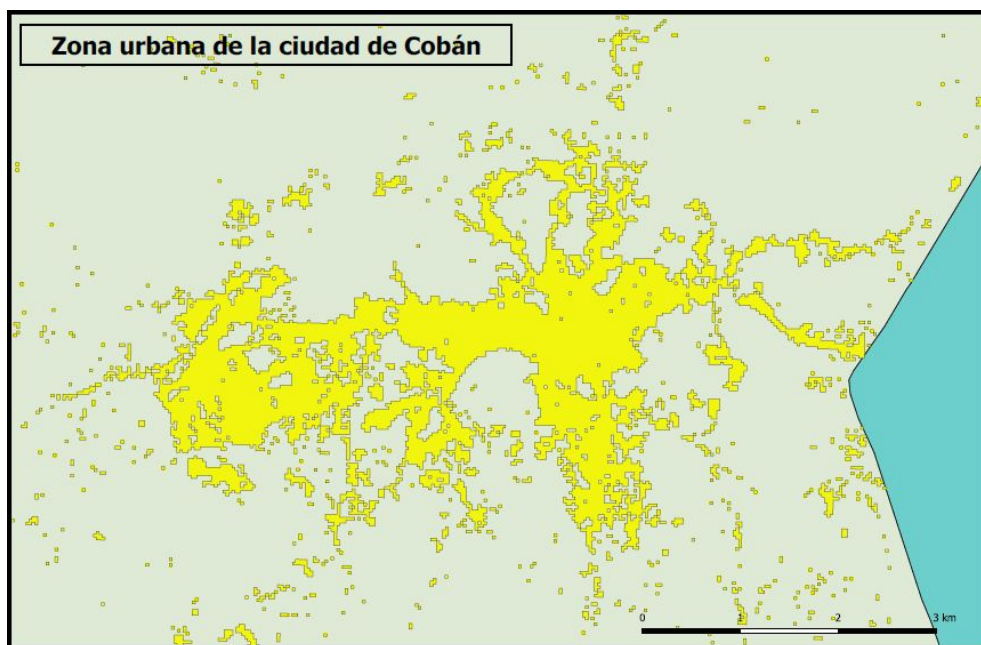


Figura 32: Zona urbana de la ciudad de Cobán, de la clasificación de uso de suelo para el año 2015.
Fuente: Elaboración propia.

A manera de resumen, se condensan en el Cuadro 12 las estimaciones de exactitud global de las matrices de confusión, los intervalos de fiabilidad para cada una y por último los índices Kappa para las tres clasificaciones realizadas. Se observa que, de las tres clasificaciones, la realizada para el año 2000 es la más exacta, teniendo un índice de 0.80, aunque los índices de para los años 1990 y 2015 no distan del obtenido para el año 2000, siendo todos superiores a 0.70 por lo que las clasificaciones son válidas y fiables.

Cuadro 12: Exactitudes globales, intervalos de fiabilidad e índices Kappa.

Año	Estimación de exactitud global (%)	Error esperado (%)	Intervalo (%)	Índice Kappa
1990	82.60	± 6.32	76.28 - 88.92	0.73
2000	94.90	± 3.67	91.23 - 98.57	0.80
2015	85.50	± 5.88	79.63 - 91.38	0.77

Nota: Elaboración propia.

En lo que concierne al comportamiento de la dinámica urbana del municipio de Cobán, se muestran en el Cuadro 13 los resultados que fueron comentados para cada año, así como las tasas de crecimiento anual para los períodos entre años de estudio.

Otro aspecto importante que vale la pena destacar es el porcentaje de área cubierto por la zona urbana en el municipio, para los 3 años de estudio. Haciendo referencia a este tópico, pese al crecimiento significativo que se produjo del año 1990 al año 2015, el porcentaje cubierto por zona urbana no alcanza a abarcar el 1% de la superficie total del municipio (2,132 km²), siendo mínima la extensión de suelo destinada a este uso, tal como se observa en el cuadro a continuación.

Cuadro 13: Comportamiento de la expansión urbana del municipio de Cobán, período 1990-2015.

Año	Área (km²)	Área (%)	Período	Período (años)	Aumento (km²)	Aumento (%)	Tasa (km²/año)
1990	3.16	0.15	-	-	-	-	-
2000	8.05	0.38	1990-2000	10	4.88	254.41	0.49
2015	17.89	0.84	2000-2015	15	9.84	222.28	0.66
2015	17.89	0.84	1990-2015	25	14.72	565.51	0.59

Nota: Elaboración propia.

La comparación visual de la cobertura urbana de la ciudad de Cobán se muestra en la Figura 33, donde se encuentran superpuestas las coberturas urbanas obtenidas de las clasificaciones realizadas.

Se observa que en cuanto a forma, se ha presentado una tendencia consistente y uniforme en el crecimiento de la ciudad, sin embargo, también es importante destacar que la zona urbanizada hacia el año 2015 se diversificó y se extendió hacia zonas antes no utilizadas para fines urbanos, no solo en las cercanías de la ciudad, sino en regiones más retiradas de esta, tal y como se observa en la mancha urbana para el 2015 (en amarillo). De igual manera se observa que alrededor del año 2000 la ciudad comenzó a extenderse hacia el este, principalmente en las vías de salida de la ciudad (extensiones alargadas en la parte derecha de la figura), así como en las vías ubicadas en el norte de la ciudad (extensiones alargadas en la parte superior de la Figura 33).

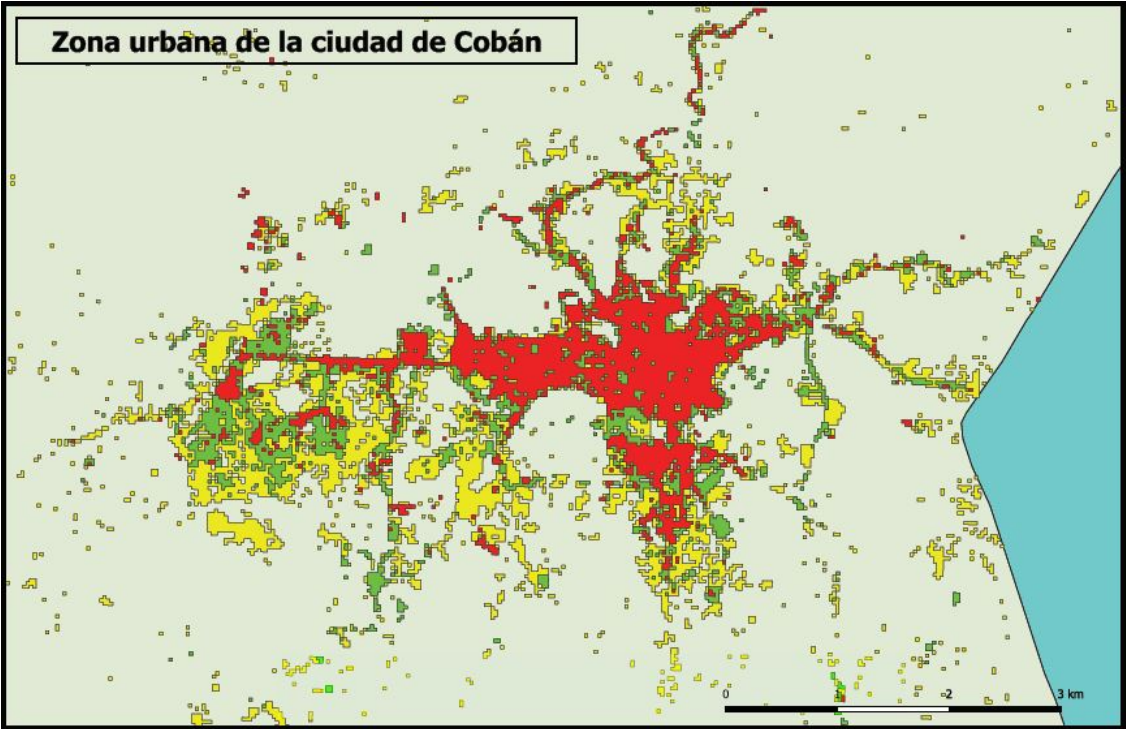


Figura 33: Comparativa de la zona urbana de la ciudad de Cobán para los tres años de estudio (Año 1990 - Rojo, Año 2000 - Verde, Año 2015 - Amarillo).
Fuente: Elaboración propia.

Conclusiones

El estudio multitemporal de la dinámica urbana del municipio de Cobán es de carácter válido y fiable, esto fundamentado en la precisión obtenida de las clasificaciones de las imágenes satelitales de los años de interés y, principalmente en los valores de los índices Kappa calculados, los cuales fueron superiores 0.70, teniendo el mayor valor para la clasificación del año 2000, donde se obtuvo un índice de 0.80.

A la vista de los resultados obtenidos del análisis multitemporal se pudo determinar y cuantificar el comportamiento creciente de la mancha urbana del municipio de Cobán, el cual no es de carácter constante, sino que con el paso del tiempo se ha acelerado. Dicho comportamiento presenta dos fases definidas por los años escogidos para el estudio; la primera de estas fases está comprendida entre el primer y segundo años de estudio, es decir entre los años 1990 y 2000, en donde la tasa anual de crecimiento urbano corresponde a 0.48 km^2 . La segunda fase, por su parte, ubicada entre el segundo y tercer años de estudio, es decir, entre los años 2000 y 2015, presenta un aumento de la tasa de crecimiento anual con respecto a la primer etapa, siendo dicha tasa de alrededor de 0.65 km^2 , lo cual se tradujo en una ganancia de superficie destinada a usos urbanos considerable desde el año 2000 en adelante.

En términos de superficie, hacia el año de 1990 la zona urbana de Cobán abarcaba una extensión de 3.16 km^2 , equivalentes a aproximadamente 0.15% de la extensión del municipio. Hacia el año 2000, la zona urbana del municipio ascendía a 8.05 km^2 , representando aproximadamente un 0.38% del área del municipio. Finalmente, para el año 2015 la zona urbana cubrió una extensión de 17.89 km^2 , equivalente a alrededor de 0.84% del área total del municipio.

En términos de crecimiento de superficie, el crecimiento en la década de 1990 fue de alrededor de 4.8 km^2 , muy por debajo del crecimiento producido entre los años 2000 y 2015, que sobrepasó los 9.5 km^2 en dicho lapso, lo cual muestra el ritmo acelerado de crecimiento en el municipio de Cobán en la segunda y última etapa considerada para el estudio.

Si bien el crecimiento de la cobertura urbana en el municipio de Cobán presentó un crecimiento notable, es preciso destacar que para el año 2015 esta representó menos del 1%

de la superficie total del municipio, lo que denota que el suelo destinado a urbanización es mínimo, siendo la mayor parte del territorio dedicada a otros usos.

Pese a ello, el comportamiento de la dinámica urbana entre los años 1990 y 2015 se tradujo en cambios bastante drásticos en diversas regiones del municipio. La zona norte no presentó una variabilidad tan grande entre los años 1990 y 2000, mientras que en el período de 2000 a 2015 el crecimiento urbano fue alto, expandiéndose a lo largo de la franja que rodea la carretera que allí se encuentra, lo cual indica que estos elementos (vías de transporte y comunicación) son aspectos de gran influencia e impacto en el crecimiento urbano del municipio, por el hecho de que se genera una activación económica, lo cual provoca la creación de núcleos urbanos que buscan el aprovechamiento de dicha infraestructura.

La zona centro del municipio sufrió igualmente cambios notables, ya que para el año 1990 no existía presencia de urbanización en la zona, mientras que para el año 1990 ya se observan las primeras zonas urbanas (aunque reducidas) en dicha región; y para el año 2015 el crecimiento fue significativo, produciéndose una expansión a lo largo de las vías de transporte que existen en la región, siguiendo la misma tendencia que la zona norte del municipio.

En lo que se refiere a la zona sur del municipio, el crecimiento urbano hacia esta región se da a partir del año 2000, y es en el año 2015 en donde se observa el gran crecimiento que se dio en esta zona. Pasó de ser una zona casi por completo inhabitada a ser, al año 2015 una zona considerablemente poblada, lo que denota la naturaleza constantemente creciente de la zona urbana de Cobán, la cual se desarrolló grandemente del año 2000 al año 2015.

Recomendaciones

A nivel general, algunas consideraciones que pueden mencionarse son las siguientes:

- En el caso de las imágenes satelitales, éstas son un factor importante para estudios realizados a través del uso de métodos de teledetección, ya que las resoluciones espaciales determinan de gran manera la calidad de las clasificaciones del uso de suelo, que a su vez repercute en la calidad de los resultados del estudio, por lo que se recomienda utilizar imágenes con la mayor resolución disponible, ya que el de detalle de las imágenes utilizadas para el presente estudio impidió la identificación de muchos cuerpos de agua en la zona de estudio.
- Se recomienda utilizar imágenes con la menor presencia de nubes posible, ya que limitan y dificultan la realización de estudios en la superficie de interés.
- Se sugiere realizar estudios multianuales, cuya principal característica es la detección en la cobertura de suelo (en este caso cobertura urbana) entre dos fechas de referencia, con el fin de determinar tasas de crecimiento urbano más exactas y más estandarizadas, ya que las calculadas para el presente estudio responden a imágenes satelitales con la menor presencia de nubes para cada año, lo que produjo que se utilizaran imágenes de meses diferentes.
- Las imágenes empleadas son del programa LANDSAT, dado su fácil acceso, abundancia de imágenes a lo largo del tiempo y su gratuidad, ofreciendo muy buenos resultados para áreas extensas de estudio, en contraposición con áreas pequeñas en las que se desea mayor detalle, por lo que se recomienda emplear imágenes de otras plataformas para estudios de esta naturaleza.
- Los resultados presentados en las matrices de confusión, como se detalla en la sección de resultados, están en términos de puntos de verificación. Una práctica observada en estudios consultados para la elaboración del presente es la construcción de matrices de confusión en término de píxeles, por lo que, si se busca una validación de otra

naturaleza, pueden hacerse uso de áreas de entrenamiento de validación, y realizar un conteo para verificar la congruencia de los píxeles con la cobertura real.

- El análisis multitemporal de la dinámica urbana posibilita realizar actividades de seguimiento del incremento de la mancha urbana, lo que a su vez se traduce en una oportuna toma de decisiones con políticas de planificación territorial, por lo que este tipo de estudios debe de ir de mano con cualesquiera políticas de territorio que se generen en el área de interés.
- Dada la significativa presencia de nubes en la zona de estudio, para estudios posteriores que aborden temáticas similares, se sugiere, si se cuentan con los recursos, realizar levantamientos por medio de otras herramientas, tales como drones con el fin de obtener imágenes de mayor calidad y limpieza y que permitan estudiar incluso aquellas regiones cubiertas por nubes en las imágenes satelitales.

En lo que respecta a estudiantes, investigadores o cualesquiera personas que aborden estudios relacionados al presente, algunas recomendaciones son las siguientes:

- En el caso del presente estudio, este consideró únicamente aspectos biofísicos del área de estudio, por lo que, a manera de tener información de carácter más integral, sería de gran valor realizar estudios de naturaleza socioeconómica de manera que pueda comprenderse de mejor manera el comportamiento en la mancha urbana en el municipio de Cobán.
- Los resultados fueron obtenidos del estudio de tres años específicos, comprendidos entre el período de 1990 a 2015, siendo de un carácter general para el dicho período, de manera que se recomienda generar información para cada año a fin de tener un registro continuo del crecimiento de la mancha urbana.

Para el caso de instituciones y/o autoridades, las recomendaciones son las siguientes:

- Emplear estudios regulares de uso y cobertura de suelo con el fin de implementar políticas de gestión de territorio, implementación de planes de ordenamiento territorial (POT) con el fin de mejorar la condición de vida de los habitantes y evitar que se de un crecimiento desordenado y sin ningún tipo de control, que conduzca a que en un futuro cercano se presenten conflictos de transporte, acceso a vivienda, entre otros.
- Otro tópico sobre el que se sugiere hacer hincapié es la generación de información de la cobertura de suelo únicamente de la ciudad de Cobán, con vista a realizar futuros estudios específicos e interrelacionados dentro de la ciudad, tales como el crecimiento de zonas, pérdidas de vegetación y su impacto en dinámica hídrica (referida a precipitaciones y áreas de recarga) dentro de la ciudad, identificación de zonas marginales y de alto riesgo, así como el ordenamiento territorial dentro de la ciudad.
- Junto con la generación de información acerca de las tasas de crecimiento también se recomienda generar mapas anuales de cobertura urbana con el fin de observar el comportamiento de la mancha urbana de la ciudad de Cobán, de manera que puedan identificarse las áreas con mayor crecimiento y de esa cuenta predecir la dinámica futura de la mancha urbana.

-
-
- [1] E. Chuvieco, *Fundamentos de teledetección espacial*, Segunda Edición. Ediciones RIALP, S.A., 1995.
 - [2] D. A. Erba, *Catastro multifinalitario: aplicado a la definición de políticas de suelo urbano*. Lincoln Institute of Land Policy, 2007.
 - [3] A. A. Sánchez, *Análisis multitemporal de la cobertura de la tierra en la cuenca del Valle de Jesús de Otoro entre los años 2000-2006 aplicando técnicas de teledetección*. Universidad Nacional Autónoma de México, 2009.
 - [4] S. Gutiérrez, *Evaluación multitemporal de las plantaciones de eucalipto (*Eucalyptus globulus* L.), con el uso de técnicas de teledetección y S.I.G. en el cantón Inquisivi, La Paz*. Universidad Mayor de San Andrés, 2016.
 - [5] L. Coutiño Román, *Análisis multitemporal de imágenes satelitales para conocer la calidad del agua en la presa: Valle de Bravo*. Universidad Nacional Autónoma de México, 2012.
 - [6] G. Bermudez Ruiz, *Evaluación del cambio de uso de la tierra y fragmentación de la cobertura forestal en el corredor biológico Lago Arenal Tenorio, mediante técnicas de teledetección*. Universidad Nacional de Costa Rica, 2018.
 - [7] W. P. Guiñanzaca, *Sistema de información geográfica para el análisis de la realidad socioeconómica de los estudiantes de la UPS*. Universidad Politécnica Salesiana Sede Cuenca, 2011.
 - [8] D. P. Alzate Giraldo Gustavo Adolfo y Sánchez Gómez, *Análisis multitemporal por teledetección del cambio de coberturas en las veredas Pantanillo y Las Palmas del municipio de Envigado en el período comprendido entre los años 1997 y 2016*. Universidad Católica de Manizales, 2018.
 - [9] A. Murillo Sangay, *Análisis de cambios de cobertura y uso actual de la tierra con imágenes satelitales del distrito de Llacanora, período 2001-2016*. Universidad Nacional de Cajamarca, 2017.
 - [10] A. Ariza Pastrana, *Análisis de los cambios en la estructura del paisaje por incendios forestales mediante teledetección*. Universidad de Alcalá, 2017.

- [11] E. E. Calderón, *Utilización de los sistemas de información geográficos (SIG) para la propuesta del manejo de los recursos naturales renovables de la parcialidad Chipuac del municipio de Totonicapán*. Escuela de estudios de Posgrado. Universidad de San Carlos de Guatemala, 2011.
- [12] L. d. R. Ochoa, *Sistemas de Información Geográfica, Ventajas y desventajas de su utilización en Guatemala*. Universidad de San Carlos de Guatemala, 2003.
- [13] L. Congedo, "Semi-automatic Classification Plugin Documentation," 2016.
- [14] I. F. Chóez Álava, *Análisis de la cobertura vegetal y cambio de uso de suelo en el área de influencia del canal Aznúcar-Ríos Verde mediante teledetección*. Universidad de Guayaquil, 2018.

Cuadro 14: Puntos aleatorios de validación para la clasificación del año 1990.

ID	Coord X	Coord Y
0	-90.379200	15.462060
1	-90.596000	15.885212
2	-90.362900	15.433260
3	-90.691100	15.710678
4	-90.440300	15.815646
5	-90.451800	15.702853
6	-90.734300	15.745721
7	-90.598800	16.022907
8	-90.566400	15.778129
9	-90.554400	15.645530
10	-90.416200	15.586880
11	-90.360900	15.742127
12	-90.455900	15.793543
13	-90.723200	15.749433
14	-90.559800	15.961612
15	-90.466100	15.483093
16	-90.356500	15.583123
17	-90.324700	15.358766
18	-90.362500	15.372746
19	-90.358900	15.409587
20	-90.695500	15.699645
21	-90.492800	15.953108
22	-90.725400	15.796974
23	-90.326300	15.496262
24	-90.671500	16.034563
25	-90.491100	15.537109

(Continúa en la siguiente página)

Continuación cuadro 14

ID	Coord X	Coord Y
26	-90.389600	15.738062
27	-90.644400	15.727296
28	-90.604900	16.026921
29	-90.804700	15.769027
30	-90.581700	15.833743
31	-90.514500	15.932302
32	-90.485000	15.918210
33	-90.355400	15.443547
34	-90.617300	15.983611
35	-90.405000	15.742574
36	-90.358400	15.688311
37	-90.602300	15.828545
38	-90.659500	15.934128
39	-90.546200	15.480226
40	-90.553200	15.610959
41	-90.550300	15.709049
42	-90.421800	15.540669
43	-90.589800	15.582998
44	-90.503300	15.879548
45	-90.464100	15.878734
46	-90.541100	15.504781
47	-90.640100	15.912010
48	-90.632200	15.946475
49	-90.432400	15.713948
50	-90.467800	15.577256
51	-90.290400	15.375622
52	-90.529700	15.594549
53	-90.637000	15.624536
54	-90.731700	15.856484
55	-90.783000	15.774531
56	-90.526100	15.757805
57	-90.403000	15.576722
58	-90.470200	15.741884
59	-90.632800	15.793160
60	-90.354900	15.706332
61	-90.531000	15.963800
62	-90.606000	15.917489
63	-90.557500	15.726964
64	-90.375300	15.550320
65	-90.568000	15.726761
66	-90.595500	15.479472
67	-90.711600	15.673826
68	-90.360500	15.465449

(Continúa en la siguiente página)

Continuación cuadro 14

ID	Coord X	Coord Y
69	-90.522900	15.575995
70	-90.388700	15.682443
71	-90.595100	15.890063
72	-90.760800	15.789743
73	-90.405000	15.458155
74	-90.688600	15.712365
75	-90.522600	15.612971
76	-90.368200	15.430862
77	-90.473900	15.846081
78	-90.643100	15.818319
79	-90.554600	15.826195
80	-90.414000	15.520828
81	-90.673500	16.021086
82	-90.603100	15.916110
83	-90.624200	15.813594
84	-90.707300	15.777449
85	-90.606100	15.525308
86	-90.675300	15.699561
87	-90.634400	15.639469
88	-90.656000	15.865349
89	-90.718400	15.907321
90	-90.563600	15.853675
91	-90.634200	15.879490
92	-90.591200	15.906433
93	-90.505100	15.686934
94	-90.343600	15.434087
95	-90.377600	15.660612
96	-90.484600	15.613192
97	-90.542300	15.796810
98	-90.777500	15.786175
99	-90.590400	15.764795
100	-90.462300	15.800152
101	-90.519800	15.871135
102	-90.564800	15.556228
103	-90.729800	15.854498
104	-90.421600	15.598013
105	-90.707100	15.762422
106	-90.707700	15.719653
107	-90.652700	15.935694
108	-90.413500	15.650877
109	-90.628500	15.979993
110	-90.488500	15.746279
111	-90.448900	15.577811

(Continúa en la siguiente página)

Continuación cuadro 14

ID	Coord X	Coord Y
112	-90.553700	15.712326
113	-90.569500	15.721936
114	-90.688600	15.930298
115	-90.484900	15.931982
116	-90.587300	15.901496
117	-90.538700	15.790102
118	-90.516900	15.839111
119	-90.636100	15.897162
120	-90.631400	15.781382
121	-90.346800	15.458733
122	-90.574500	15.721748
123	-90.505600	15.763868
124	-90.548400	15.728899
125	-90.535100	15.634984
126	-90.373000	15.590711
127	-90.636200	16.035926
128	-90.664100	15.651081
129	-90.779800	15.765564
130	-90.601300	15.821030
131	-90.428900	15.421074
132	-90.397800	15.532480
133	-90.496700	15.648569
134	-90.526700	15.956212
135	-90.482700	15.833708
136	-90.489700	15.681398
137	-90.489400	15.674616

Nota: Elaboración propia.

Cuadro 15: Puntos aleatorios de validación para la clasificación del año 2000.

ID	Coord X	Coord Y
0	-90.683530	15.731183
1	-90.346260	15.559872
2	-90.698640	15.840481
3	-90.573540	15.766396
4	-90.599570	15.922959
5	-90.580000	15.973376
6	-90.596890	15.634207
7	-90.367030	15.474642
8	-90.631900	15.750091
9	-90.736940	15.735659
10	-90.464200	15.805823
11	-90.688810	15.860502

(Continúa en la siguiente página)

Continuación cuadro 15

ID	Coord X	Coord Y
12	-90.629530	15.596527
13	-90.553570	15.916777
14	-90.382110	15.744548
15	-90.784330	15.769628
16	-90.420900	15.766375
17	-90.584910	15.975471
18	-90.632870	16.036546
19	-90.544190	15.574293
20	-90.536210	15.693626
21	-90.326130	15.705205
22	-90.737950	15.827482
23	-90.585080	15.481521
24	-90.524970	15.696433
25	-90.437070	15.567106
26	-90.631020	15.807906
27	-90.543560	15.520419
28	-90.636380	15.636472
29	-90.654400	15.785563
30	-90.357870	15.735237
31	-90.583640	15.802922
32	-90.599080	15.891538
33	-90.393340	15.708403
34	-90.464130	15.526388
35	-90.610290	15.722347
36	-90.652130	15.848055
37	-90.387220	15.616195
38	-90.449460	15.820623
39	-90.575880	15.830468
40	-90.499650	15.905852
41	-90.504770	15.712361
42	-90.581840	15.818844
43	-90.562420	15.612806
44	-90.430200	15.785309
45	-90.403140	15.678086
46	-90.649310	15.639882
47	-90.449910	15.732469
48	-90.702460	15.830870
49	-90.438800	15.802490
50	-90.654780	15.769499
51	-90.560850	15.862675
52	-90.580850	15.920119
53	-90.615640	15.969908
54	-90.642780	15.971007

(Continúa en la siguiente página)

Continuación cuadro 15

ID	Coord X	Coord Y
55	-90.686760	15.970332
56	-90.284430	15.373776
57	-90.497910	15.702578
58	-90.586310	15.944583
59	-90.755190	15.757533
60	-90.423240	15.428053
61	-90.773590	15.697150
62	-90.634590	15.903425
63	-90.448110	15.574585
64	-90.633950	15.667858
65	-90.700360	15.944931
66	-90.539520	15.710408
67	-90.737120	15.691398
68	-90.665710	15.852983
69	-90.544870	15.801573
70	-90.615240	15.915793
71	-90.632150	15.812336
72	-90.446380	15.676374
73	-90.717280	15.704963
74	-90.571430	15.549404
75	-90.544110	15.996579
76	-90.706350	15.905766
77	-90.690570	15.759537
78	-90.771810	15.804843
79	-90.456670	15.516155
80	-90.359540	15.701778
81	-90.577460	15.834941
82	-90.629360	15.608110
83	-90.487840	15.843298
84	-90.445330	15.737683
85	-90.679860	15.884549
86	-90.410430	15.581911
87	-90.535460	15.683473
88	-90.434840	15.495949
89	-90.707640	15.663699
90	-90.598960	15.613708
91	-90.554960	15.626521
92	-90.343360	15.498322
93	-90.516620	15.610157
94	-90.680980	15.788282
95	-90.370440	15.521810
96	-90.720080	15.688232
97	-90.396420	15.494786

(Continúa en la siguiente página)

Continuación cuadro 15

ID	Coord X	Coord Y
98	-90.386110	15.449288
99	-90.624420	15.579501
100	-90.414560	15.632160
101	-90.348420	15.497851
102	-90.424090	15.592462
103	-90.644280	15.761649
104	-90.351510	15.368691
105	-90.366420	15.706573
106	-90.486100	15.881362
107	-90.515330	15.918039
108	-90.399930	15.575810
109	-90.603290	15.683933
110	-90.593440	15.676109
111	-90.454140	15.676157
112	-90.360440	15.464232
113	-90.645060	15.670320
114	-90.565050	15.530431
115	-90.693320	15.952187
116	-90.612930	15.730719
117	-90.365350	15.486976
118	-90.600630	15.776713
119	-90.668700	15.885353
120	-90.712000	15.745761
121	-90.743590	15.780258
122	-90.296590	15.345944
123	-90.343000	15.357245
124	-90.648450	16.034690
125	-90.601220	15.803121
126	-90.691740	15.963208
127	-90.609440	15.789361
128	-90.704090	15.752002
129	-90.703690	15.903453
130	-90.572910	15.881257
131	-90.708270	15.750706
132	-90.577300	15.720293
133	-90.554240	15.932599
134	-90.565960	15.476028
135	-90.600540	15.782500
136	-90.564980	15.842978
137	-90.346160	15.417636

Nota: Elaboración propia.

Cuadro 16: Puntos aleatorios de validación para la clasificación del año 2015.

ID	Coord X	Coord Y
0	-90.525720	15.711883
1	-90.416480	15.560230
2	-90.627380	15.891355
3	-90.470500	15.834129
4	-90.377610	15.578785
5	-90.382110	15.483829
6	-90.404250	15.585943
7	-90.505260	15.890327
8	-90.672630	15.880108
9	-90.529210	15.485436
10	-90.556590	15.641921
11	-90.608260	15.992235
12	-90.580950	15.546968
13	-90.744320	15.765860
14	-90.635890	15.728049
15	-90.666290	15.898496
16	-90.475810	15.642060
17	-90.418420	15.751200
18	-90.696490	15.737319
19	-90.607230	15.810368
20	-90.477060	15.619761
21	-90.395120	15.711479
22	-90.273610	15.332583
23	-90.415640	15.577251
24	-90.567800	15.657700
25	-90.540510	15.756366
26	-90.724030	15.765536
27	-90.534030	15.531333
28	-90.389530	15.620815
29	-90.434430	15.613957
30	-90.489760	15.529578
31	-90.365150	15.661125
32	-90.421050	15.594475
33	-90.506590	15.654927
34	-90.599270	15.484010
35	-90.547890	15.674867
36	-90.465830	15.829691
37	-90.426180	15.554478
38	-90.623580	15.763648
39	-90.732110	15.792248
40	-90.445840	15.497548
41	-90.702870	15.944017
42	-90.643550	15.732597

(Continúa en la siguiente página)

Continuación cuadro 16

ID	Coord X	Coord Y
43	-90.269930	15.335917
44	-90.635850	15.967912
45	-90.415320	15.476659
46	-90.717680	15.911965
47	-90.684620	15.653564
48	-90.405370	15.532209
49	-90.656380	15.716627
50	-90.395940	15.479201
51	-90.399270	15.402646
52	-90.628730	15.871550
53	-90.378700	15.725980
54	-90.474720	15.906985
55	-90.669320	15.757194
56	-90.345030	15.372519
57	-90.585080	15.708584
58	-90.382630	15.655084
59	-90.573490	15.793605
60	-90.594380	15.880016
61	-90.473750	15.769498
62	-90.545430	15.532210
63	-90.350320	15.709361
64	-90.678990	15.772011
65	-90.430710	15.682876
66	-90.658730	16.021406
67	-90.460860	15.669338
68	-90.509080	15.739126
69	-90.366160	15.470318
70	-90.407570	15.771612
71	-90.384660	15.423623
72	-90.429500	15.521058
73	-90.748060	15.746004
74	-90.695590	15.685045
75	-90.583120	15.483919
76	-90.516580	15.616124
77	-90.583590	15.874084
78	-90.573480	15.780232
79	-90.605020	15.491407
80	-90.658190	15.895025
81	-90.536310	15.844799
82	-90.468220	15.617513
83	-90.693490	15.847177
84	-90.390460	15.647396
85	-90.608900	15.495994

(Continúa en la siguiente página)

Continuación cuadro 16

ID	Coord X	Coord Y
86	-90.444000	15.835507
87	-90.667970	15.951211
88	-90.322660	15.719720
89	-90.399300	15.464748
90	-90.595560	15.711827
91	-90.519480	15.521444
92	-90.333150	15.567436
93	-90.575820	15.882612
94	-90.457960	15.789670
95	-90.664500	15.858821
96	-90.643310	15.848953
97	-90.723970	15.678925
98	-90.530700	15.758530
99	-90.696410	15.911029
100	-90.584650	15.618680
101	-90.476160	15.848520
102	-90.521690	15.916971
103	-90.566540	15.473512
104	-90.405930	15.682903
105	-90.573480	15.903620
106	-90.578490	15.720430
107	-90.464200	15.897309
108	-90.759920	15.749361
109	-90.558830	15.536709
110	-90.424110	15.404096
111	-90.621290	15.485658
112	-90.598930	15.717151
113	-90.594720	15.598408
114	-90.688320	15.909880
115	-90.618200	15.667268
116	-90.321840	15.720573
117	-90.408580	15.557493
118	-90.459360	15.861306
119	-90.510800	15.535109
120	-90.466650	15.542787
121	-90.551310	15.488421
122	-90.574230	15.536897
123	-90.409520	15.550038
124	-90.643290	15.995216
125	-90.358250	15.543270
126	-90.642560	15.907943
127	-90.526410	15.695077
128	-90.656580	15.809671

(Continúa en la siguiente página)

Continuación cuadro 16

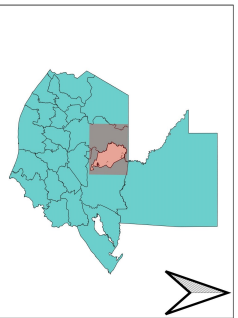
ID	Coord X	Coord Y
129	-90.711650	15.716723
130	-90.712300	15.712038
131	-90.649230	15.672039
132	-90.512460	15.693218
133	-90.569700	15.596299
134	-90.544480	15.635925
135	-90.548540	15.471755
136	-90.637490	15.677835
137	-90.396650	15.563778

Nota: Elaboración propia.

Cobertura de la zona urbana del municipio de Cobán, Alta Verapaz, Guatemala, año 1990



Zona urbana de la ciudad de Cobán



- Legenda**
- Zona urbana, año 1990
 - Municipio de Cobán
 - Departamentos de Guatemala

Cobertura de la zona urbana para el año 1990:

Municipio/Área urbana (km²)

Cobán	112,900
-------	---------

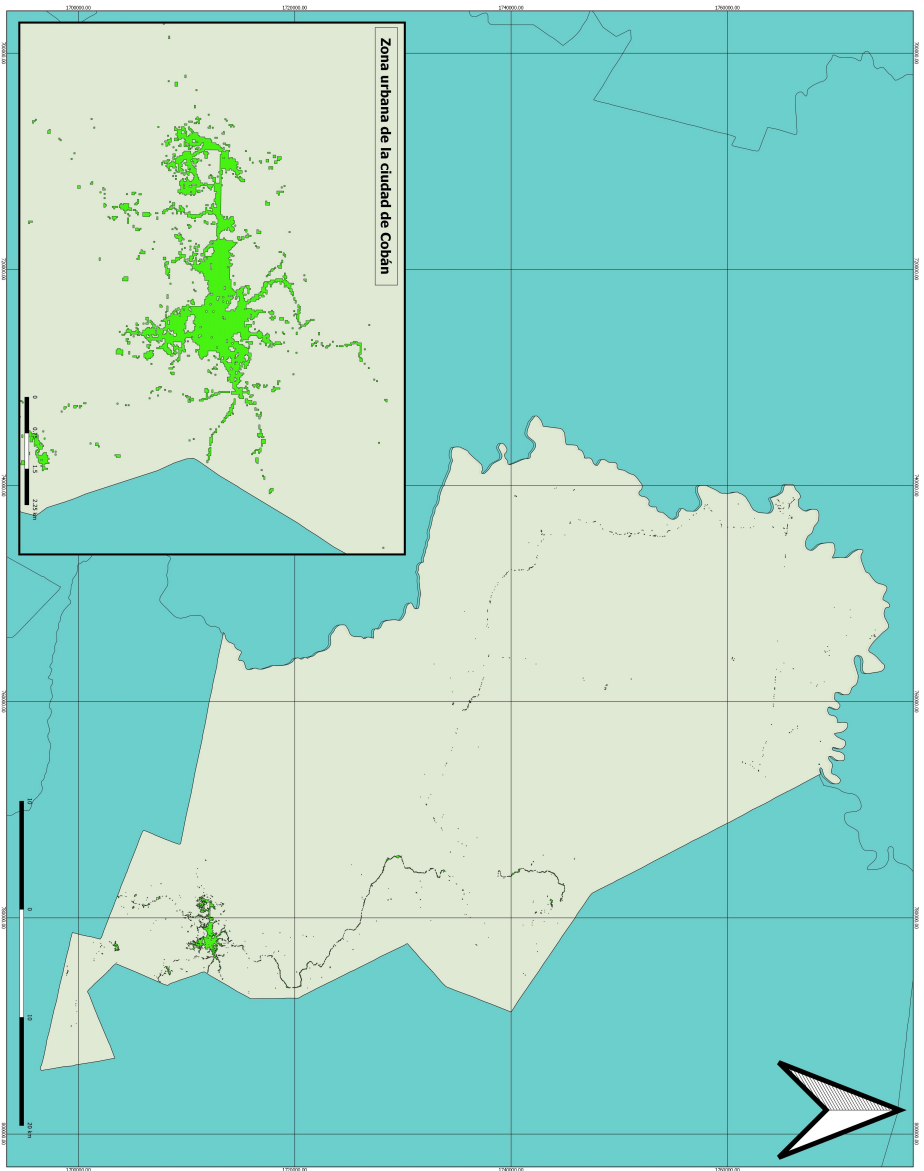
Análisis multitemporal de la dinámica urbana del municipio de Cobán, Alta Verapaz, en los años 1990, 2000 y 2015, basado en técnicas de tele-detección, mediante el uso de Sistemas de Información Geográfica.

Universidad del Valle de Guatemala.

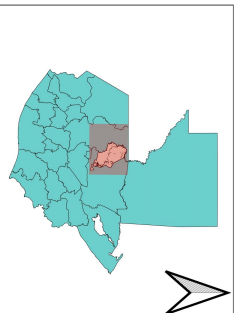
DESCRIPCIÓN CARTOGRAFICA
 Sistema de Coordenadas: UTM Zona 15N
 Proyección: UTM Zona 15N
 Escala: 1:125000

FUENTE:
 Mapa elaborado mediante clasificación de imágenes LANDSAT.
 Elaborado por: Caidin Guenara, K. 2019

Cobertura de la zona urbana del municipio de Cobán, Alta Verapaz, Guatemala, año 2000



Zona urbana de la ciudad de Cobán



Leyenda

- Zona urbana, año 2000
- Municipio de Cobán
- Departamentos de Guatemala

Cobertura de la zona urbana para el año 2000:

Municipio/Área urbana (km ²)
Cobán
Alta Verapaz
Quiché

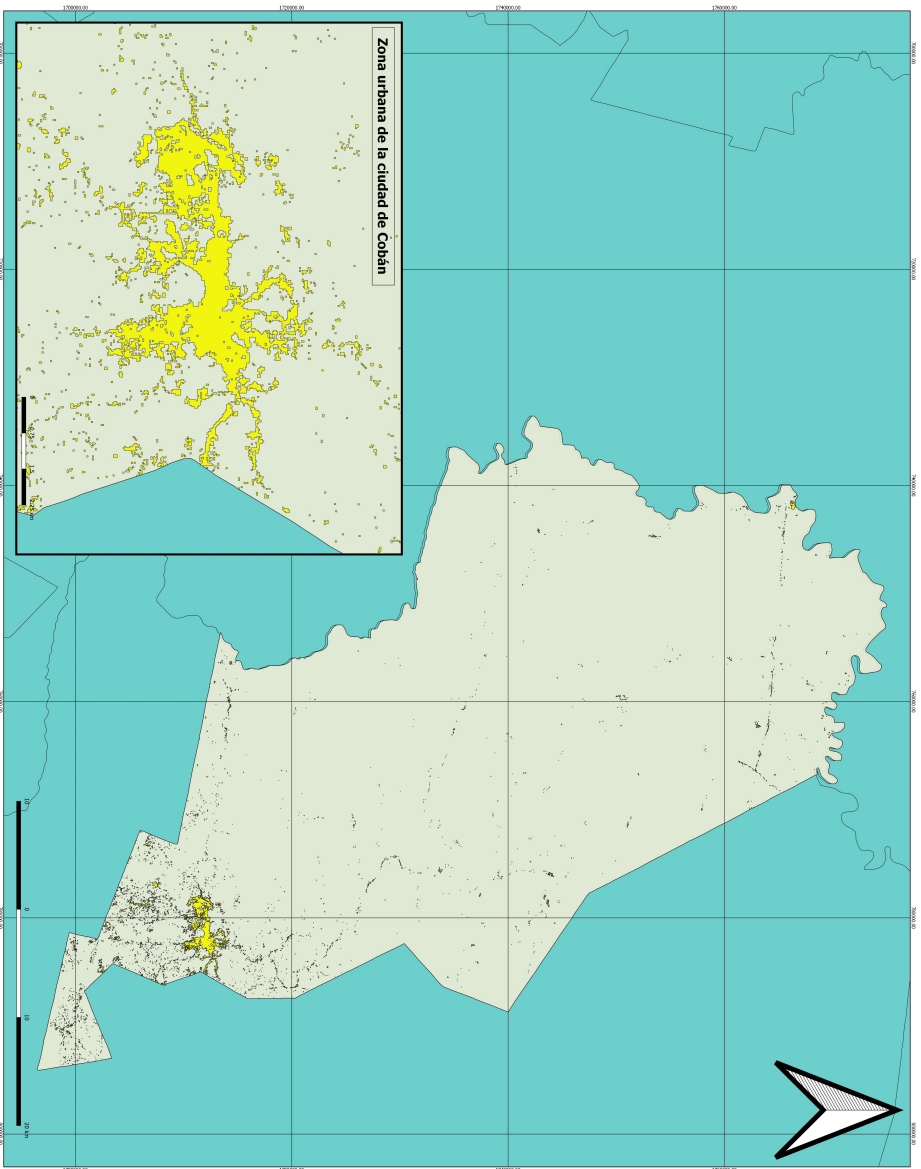
Análisis multitemporal de la dinámica urbana del municipio de Cobán, Alta Verapaz, en los años 1990, 2000 y 2015, basado en técnicas de tele-detección, mediante el uso de sistemas de Información Geográfica.

Universidad del Valle de Guatemala.

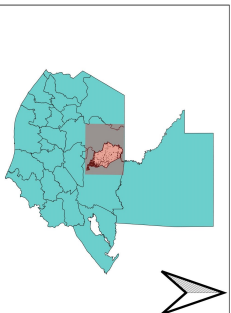
DESCRIPCIÓN CARTOGRAFICA
 Sistema de Proyección: UTM
 Datum: WGS 1984
 Escala: 1:125000

FUENTE:
 Mapa elaborado mediante clasificación de imágenes LANDSAT.
 Elaborado por: Caidin Quevedo, K. 2019.

Cobertura de la zona urbana del municipio de Cobán, Alta Verapaz, Guatemala, año 2015



Zona urbana de la ciudad de Cobán



- Leyenda**
- Zona urbana, año 2015
 - Municipio de Cobán
 - Departamentos de Guatemala

Cobertura de la zona urbana para el año 2015:

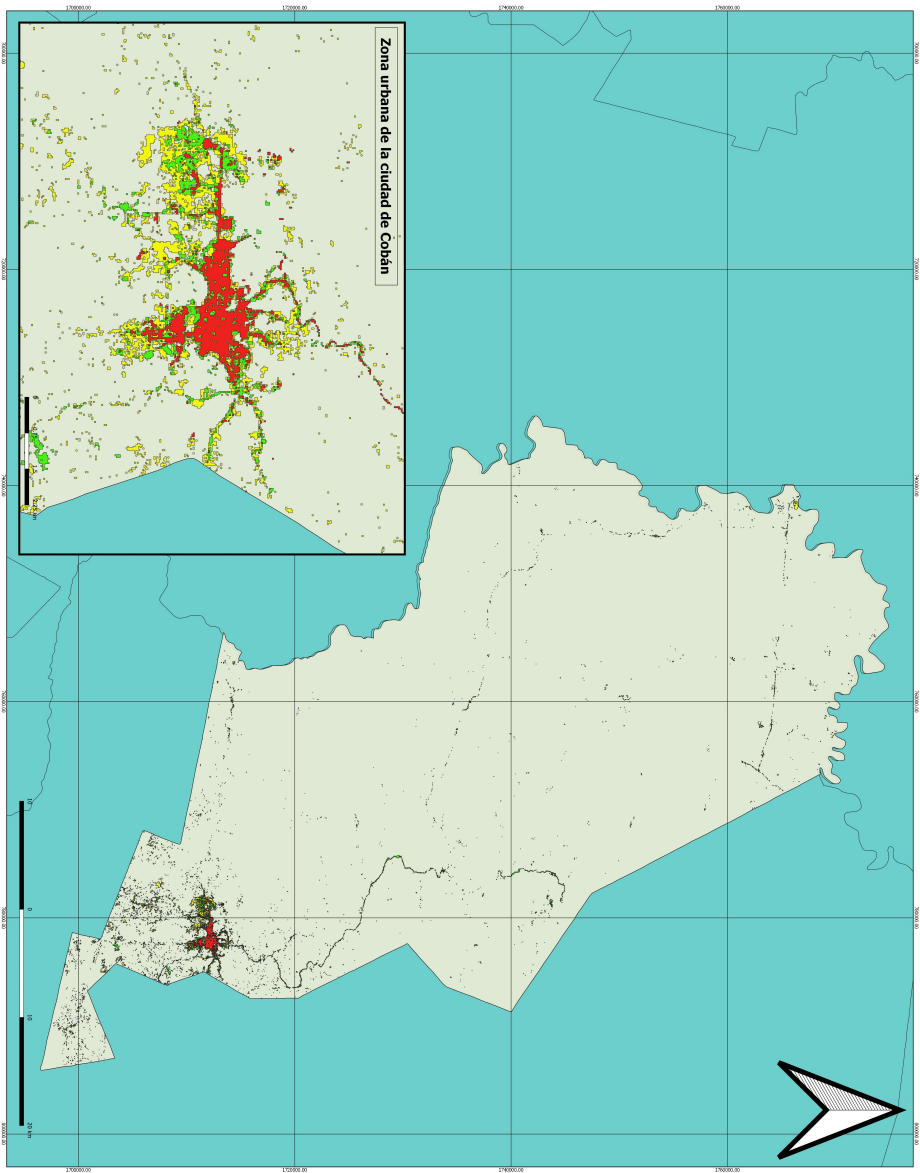
Municipio/Área urbana (km ²)
Cobán
1125000

Análisis multitemporal de la dinámica urbana del municipio de Cobán, Alta Verapaz, en los años 1990, 2000 y 2015, basado en técnicas de validación, mediante el uso de Sistemas de Información Geográfica.

Universidad del Valle de Guatemala.
 DESCRIPCIÓN CARTOGRAFICA
 Sistema de coordenadas:
 Proyección: UTM 15N
 Escala: 1:125000

FUENTE:
 Mapa elaborado mediante clasificación de imágenes LANDSAT.
 Elaborado por: Caidin Guenara, K. 2019.

Zona urbana del municipio de Cobán, Alta Verapaz, Guatemala, años 1990, 2000 y 2015



Leyenda

- Zona urbana, año 1990
- Zona urbana, año 2000
- Zona urbana, año 2015
- Municipio de Cobán
- Departamentos de Guatemala

Cobertura de la zona urbana:

Año	Municipio	Área urbana (Km ²)
1990	Cobán	3,163
2000	Cobán	8,047
2015	Cobán	17,887

Análisis multitemporal de la dinámica urbana del municipio de Cobán, Alta Verapaz, en los años 1990, 2000 y 2015, basado en técnicas de teledetección, mediante el uso de sistemas de Información Geográfica.

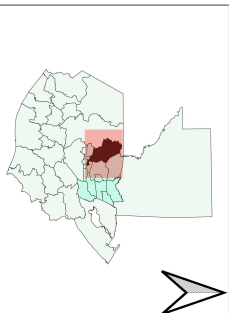
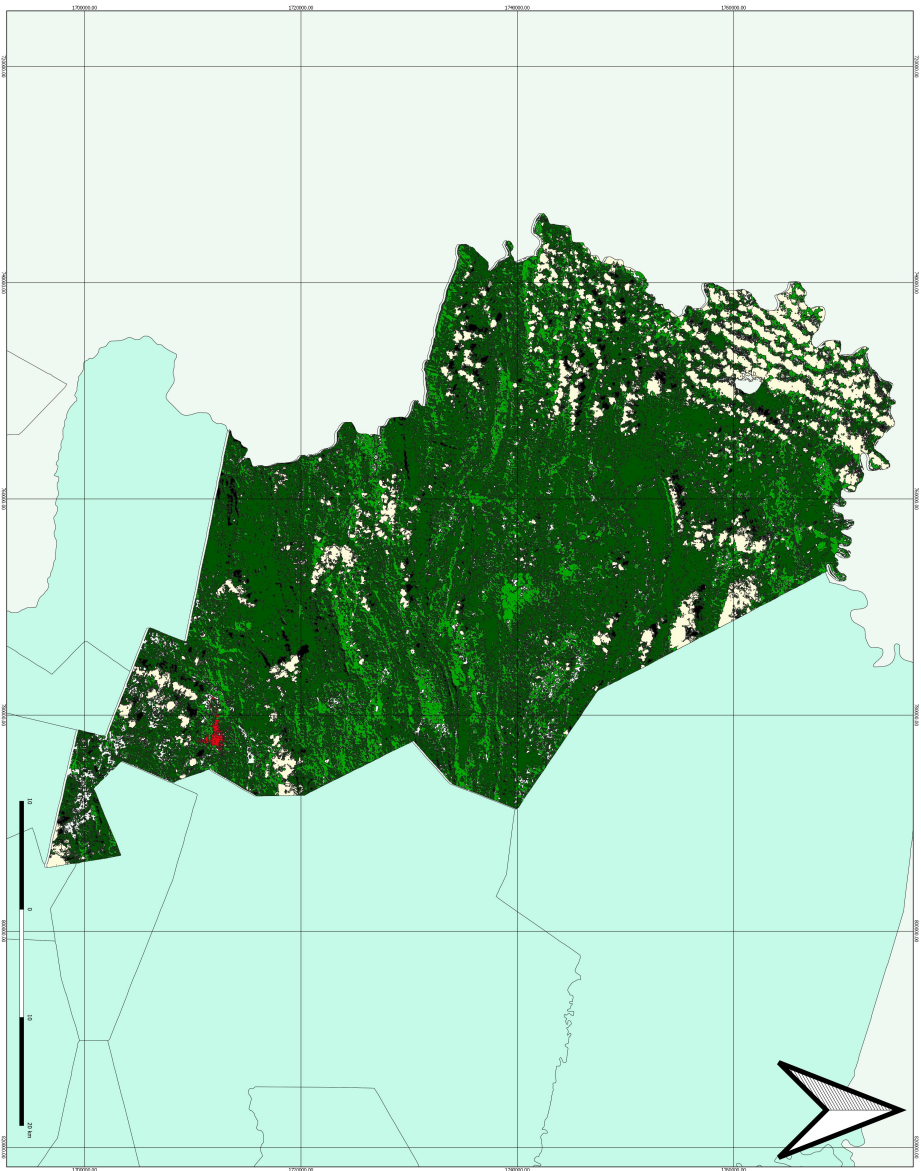
Universidad del Valle de Guatemala.

DESCRIPCIÓN CARTOGRAFICA

Sistema de Coordenadas:
Proyección: UTM Zona 15 N
Datum: WGS 1984
Escala: 1:125000

FUENTE:
Mapa elaborado mediante clasificación de imágenes LANDSAT.
Elaborado por: Caidin Guevara, K. 2019.

Cobertura y uso de suelo para el año 1990, municipio de Cobán, Alta Verapaz, Guatemala



Leyenda

- Zona urbana
- Clasificación año 1990
- Vegetación Primaria
- Vegetación Secundaria
- Otros usos de suelo
- Cuerpos de agua
- Nubes
- Sombras
- Alta Verapaz
- Departamentos de Guatemala

Cobertura de la zona urbana para el año 1990:

Municipio	Área urbana (km²)
Cobán	3.153

Análisis multitemporal de la dinámica urbana del municipio de Cobán, Alta Verapaz, en los años 1990, 2000 y 2015, basado en técnicas de teledetección, mediante el uso de sistemas de Información Geográfica.

Universidad del Valle de Guatemala.

DESCRIPCIÓN CARTOGRAFICA

Sistema de coordenadas:

Proyección: UTM Zona 15 N

Datum: WGS 1984

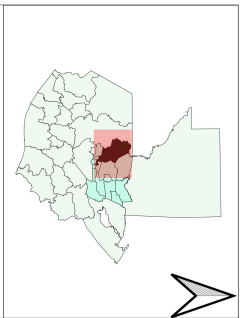
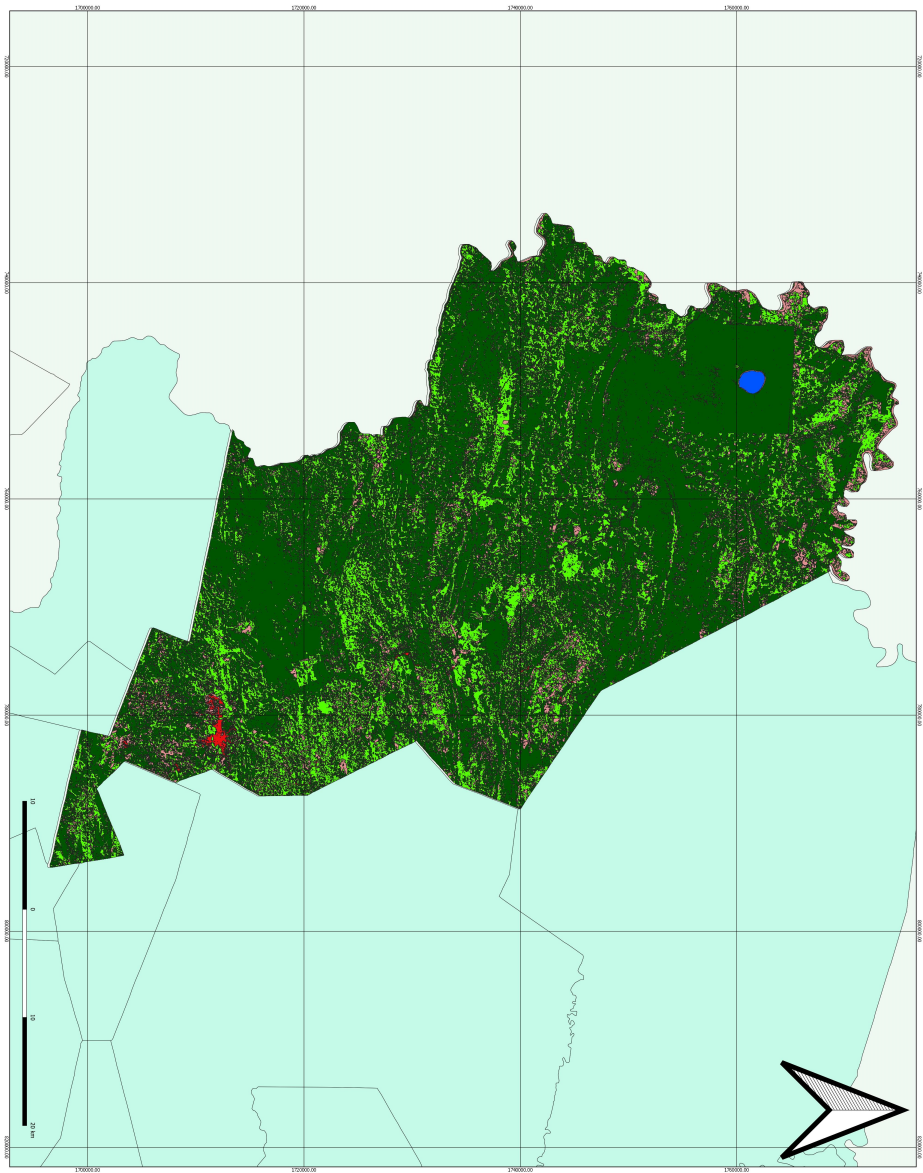
Escala: 1:125000

FUENTE:

Mapa elaborado mediante clasificación de imágenes LANDSAT.

Elaborado por: Caidin Quevedo, K. 2019.

Cobertura y uso de suelo para el año 2000, municipio de Cobán, Alta Verapaz, Guatemala



Leyenda

- Zona urbana
- Clasificación año 2000
- Vegetación primaria
- Vegetación secundaria
- Otros usos de suelo
- Cuerpos de agua
- Alta Verapaz
- Departamentos de Guatemala

Cobertura de la zona urbana para el año 2000:

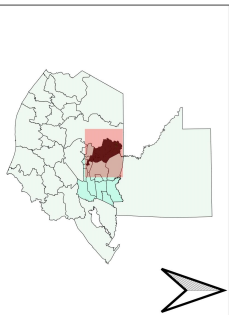
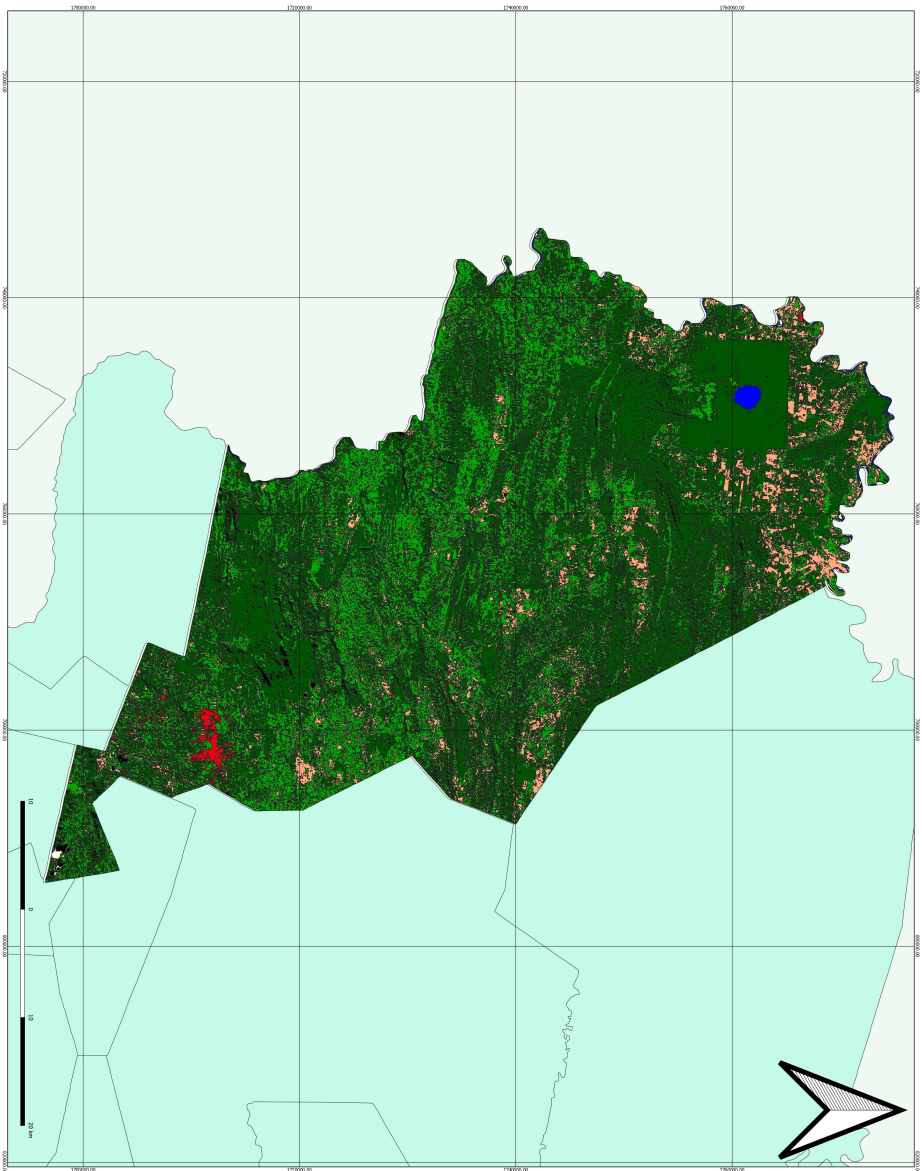
Municipio	Área urbana (km²)
Cobán	8,047

Análisis multitemporal de la dinámica urbana del municipio de Cobán, Alta Verapaz, en los años 1990, 2000 y 2015, basado en técnicas de tele-detección, mediante el uso de sistemas de Información Geográfica.

Universidad del Valle de Guatemala.
DESCRIPCIÓN CARTOGRAFICA
Sistema de Coordenadas:
Proyección: UTM Zona 15N
Datum: NAD 83
Escala: 1:125000

FUENTE:
Mapa elaborado mediante clasificación de imágenes LANDSAT.
Elaborado por: Cadiú Guenara, K. 2019

Cobertura y uso de suelo para el año 2015, municipio de Cobán, Alta Verapaz, Guatemala



Legenda

- Zona urbana
- Clasificado año 2015
- Vegetación primaria
- Vegetación Secundaria
- Cuerpos de agua
- Otros usos de suelo
- Nubes
- Sombras
- Alta Verapaz
- Departamentos de Guatemala

Cobertura de la zona urbana para el año 2015:

Municipio	Área urbana (km ²)
Cobán	17,887

Análisis multitemporal de la dinámica urbana del municipio de Cobán, Alta Verapaz, en los años 1990, 2000 y 2015, basado en técnicas de teledetección, mediante el uso de sistemas de Información Geográfica.

Universidad del Valle de Guatemala.

DESCRIPCIÓN CARTOGRAFICA
 Sistema de Coordenadas:
 Proyección: UTM 15N
 Datum: WGS 1984
 Escala: 1:125000

FUENTE:

Mapa elaborado mediante clasificación de imágenes LANDSAT.
 Elaborado por: Caidi Guenara, K. 2019

Aeronáutica: Ciencia y técnica que se ocupa de la construcción de vehículos capaces de volar y del estudio de los factores que favorecen el vuelo. 6

Bruma: Fenómeno atmosférico consistente en la suspensión de partículas diminutas de agua u otra materia higroscópica que limitan la visibilidad. 16

Catastral: Relativo al catastro, es decir, al registro administrativo elaborado por el Estado en el que se describen los bienes inmuebles rústicos, urbanos y de características especiales. 43

Corpúsculo: Partícula de materia de tamaño microscópico. 8

Estereoscópicas: Capaz de recoger información visual tridimensional y/o crear la ilusión de profundidad mediante una imagen estereográfica, un estereograma o una imagen 3D. 23

Eutrofización: Acumulación de residuos orgánicos en el litoral marino o en un lago, laguna, embalse, etc., que causa la proliferación de ciertas algas. 20

Fenológico: Relativo al estudio de la relación entre los factores climáticos y los ciclos de los seres vivos. 16, 18

Mesófilo: Tejido que se encuentra entre las epidermis del haz y del envés de las hojas. 18

Multiespectral: Que se encuentra compuesto de rangos de longitud de onda específicos a través del espectro electromagnético. 6, 23, 25, 33

Multitemporal: Aplicado a teledetección, hace referencia a estudios basados en la comparación de un parámetro o cobertura de dos o más imágenes satelitales o mapas de un mismo lugar en diferentes fechas. 15, 30, 44

Teledetección: Detección a distancia de informaciones que se producen en la superficie de la Tierra mediante satélites y sondas artificiales. 5, 7, 8, 11, 12, 15, 16, 21, 22, 28, 44, 46, 51