

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA

ESCUELA DE INGENIERÍA FORESTAL

**PROYECTO FINAL DE GRADUACIÓN PARA OPTAR POR EL GRADO DE
LICENCIATURA EN INGENIERÍA FORESTAL**

**COBERTURA DEL SUELO DEL AÑO 2016 DEL CANTÓN TARRAZÚ, SAN
JOSÉ, COSTA RICA**

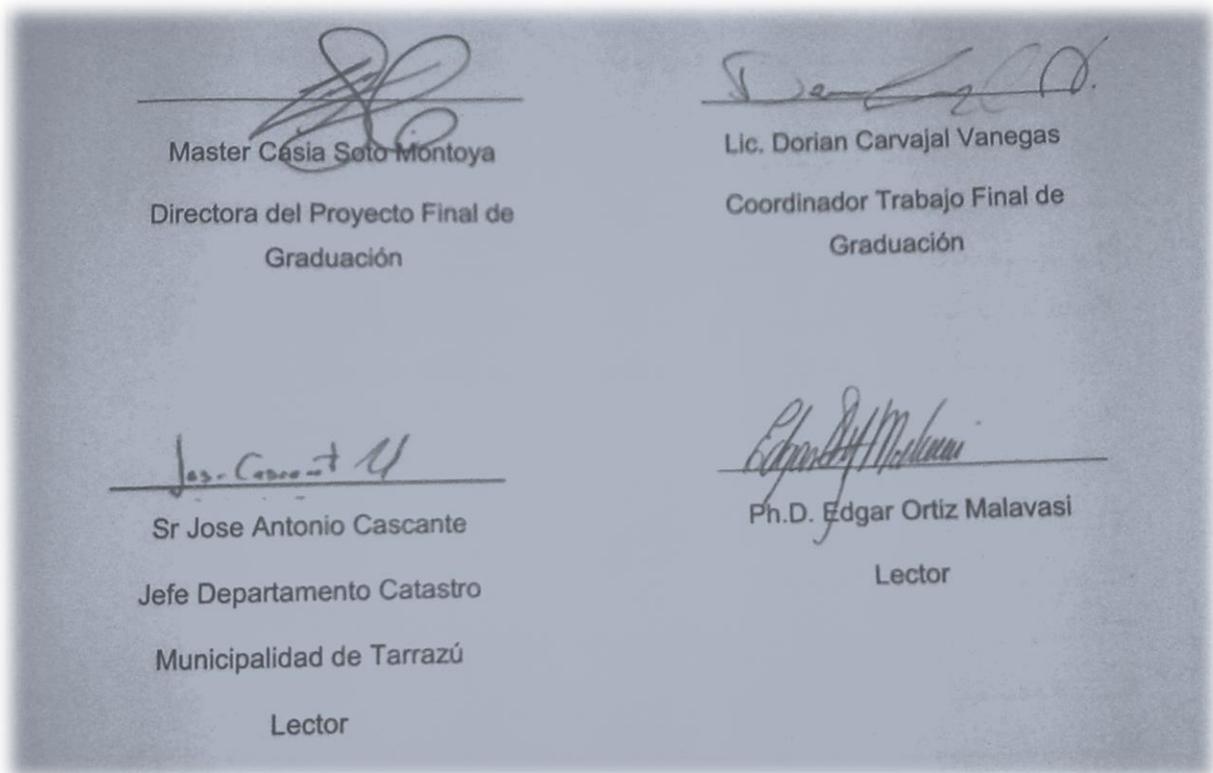
MANFRET JOSUE FALLAS UREÑA

CARTAGO, COSTA RICA

2016

CONSTANCIA DE DEFENSA PÚBLICA DE PROYECTO DE GRADUACIÓN

Proyecto de Graduación defendido públicamente ante el Tribunal Evaluador, integrado por los profesores Master Casia Soto Montoya, Sr Jose Antonio Cascante, Lic. Dorian Carvajal Vanegas, Ph. D. Edgar Ortiz Malavasi, como requisito parcial para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería Forestal, del Instituto Tecnológico de Costa Rica.



RESUMEN

El estudio consistió en la clasificación de la cobertura del suelo del cantón de Tarrazú. Se utilizaron 3 imágenes LANDSAT 8, las cuales se utilizaron de forma conjunta para realizar la clasificación final, además se validó la clasificación, se elaboró el mapa final de la clasificación para el cantón Tarrazú y de forma individual para los distritos San Marcos, San Lorenzo y San Carlos. A nivel de cantón Tarrazú la cobertura con mayor área fue el bosque secundario, la cual abarcó un 31,5 % (9414,9 ha) del cantón. El bosque maduro, bosque secundario, pastos y cultivo perenne (café) tuvieron mayor presencia en el distrito de San Lorenzo. La exactitud general de la clasificación alcanzó un valor de 86.86 % teniendo en cuenta las cinco clases analizadas con la matriz de error. Los resultados obtenidos fueron transmitidos en un taller a los funcionarios de la Municipalidad de Tarrazú, explicando su correcto uso, lo que generó una lista de acciones posibles en el cantón de Tarrazú relacionadas a la cobertura del suelo.

Palabras clave: Clasificación de cobertura, SIG, cobertura del suelo, bosque, café, Tarrazú.



ABSTRACT

The study consisted in the classification of the soil cover of the canton of Tarrazú. Three LANDSAT 8 images were used, which were used together to make the final classification, the classification was validated, the final map of the classification for the Tarrazú canton was elaborated and for the San Marcos, San Lorenzo districts And San Carlos. At the Tarrazú canton level the coverage with the largest area was the secondary forest, which covered 31.5% (9414.9 ha) of the canton. Mature forest, secondary forest, pasture and perennial (coffee) cultivation had a greater presence in the district of San Lorenzo. The general accuracy of the classification reached a value of 86.86% taking into account the five classes analyzed with the error matrix. The results obtained were transmitted in a workshop to the officials of the Municipality of Tarrazú, explaining their correct use, which generated a list of possible actions in the canton of Tarrazú related to the land cover.

Key words: Classification of coverage, GIS, soil coverage, forest, coffee, Tarrazú



Tabla de contenidos

	Pág.
1. Introducción.....	1
2. Objetivos	2
2.1 Objetivo general.....	2
2.2 Objetivos específicos	2
3. Revisión de literatura	3
3.1 Cobertura del suelo	3
3.2 Teledetección	3
3.3 Sensores remotos.....	4
3.4 Espectro electromagnético	4
3.5 Formatos de archivos	5
3.5.1 Raster.....	5
3.5.2 Vectorial	6
3.7 Resolución de las imágenes satelitales	6
3.7.1 Espacial.....	6
3.7.2 Espectral	6
3.7.3 Radiométrica	7
3.7.4 Temporal	7
3.8 Características de las imágenes Landsat 8	7
3.9 ArcGIS	8
3.11 Reflectancia de la superficie	10
3.12 Clasificación supervisada de imágenes satelitales	10
3.13 Firmas espectrales.....	10
3.14 Algoritmo de clasificación supervisada	10

3.15 Clases de cobertura.....	12
3.16 Análisis de la aleatoriedad de los datos.....	14
4. Materiales y métodos	15
4.1 Ubicación del área de estudio.....	15
4.2 Datos recolectados en campo.	16
4.3 Clases de cobertura.....	17
4.3.1 Bosque maduro	20
4.3.2 Bosque secundario.....	20
4.3.3 Pasto	20
4.3.4 Cultivo perenne (café)	21
4.3.5 Infraestructura	21
4.3.6 Nubes.....	21
4.3.7 Agua.....	21
4.4 Rutas para la toma de datos	22
4.5 Secuencia del pre-proceso y proceso de clasificación de la cobertura para el cantón de Tarrazú.....	23
4.6 Selección y adquisición de imágenes.	24
4.7 Pre-procesamiento de imágenes LANDSAT 8.....	26
4.8 Descarga y conversión de las bandas a la reflectancia de la superficie.	26
4.9 Corte de bandas de las imágenes Landsat 8.....	27
4.10 Crear el conjunto de bandas de las imágenes Landsat 8 (Band set).....	28
4.11 Clasificación de la cobertura del suelo.....	28
4.11.1 Áreas de entrenamiento	28
4.11.2 Firmas espectrales	29
4.11.3 Aplicación del algoritmo de clasificación	29



4.11.4 Unión de las tres imágenes Landsat 8 utilizadas.	30
4.11.5 Aplicación de filtro	32
4.12 Validación de la clasificación de la cobertura.	33
4.12.1 Comparación con datos tomados en campo	33
4.12.2 Análisis de aleatoriedad de los datos	35
4.13 Taller: Transferencia de información a funcionarios de la Municipalidad de Tarrazú.	35
5. Resultados y discusión.....	37
5.1 Datos de campo.....	37
5.1 Composición de la imagen multibanda	38
5.2 Clasificación de la cobertura del cantón de Tarrazú	40
5.3 Cobertura por distrito	43
5.3.1 Cobertura de San Marcos	43
5.3.2 Cobertura de San Lorenzo	45
5.3.3 Cobertura de San Carlos.....	47
5.3.4 Comparación entre distritos	49
5.4 Validación de la clasificación.....	50
5.4.1 Matriz de confusión	52
5.4.2 Análisis de aleatoriedad de los datos	54
5.5 Transferencia de información a funcionarios de la Municipalidad de Tarrazú.	55
6. Conclusiones.....	56
7. Recomendaciones	57
8. Bibliografía	58
9. Anexos	62



Tabla de Figuras

	Pág.
Figura 1. Paso de banda y longitud de onda para los sensores OLI y TIRS del satélite Landsat 8.	5
Figura 2. Ejemplificación de la probabilidad de pertenencia a una clase visualizada en la proyección de superficies en campana sobre el plano espectral generado por la banda 1 y 2.	11
Figura 3. Distribución de vías primarias y secundarias en el cantón de Tarrazú... ..	23
Figura 4. Secuencia del pre-proceso y proceso de clasificación de la cobertura para el cantón de Tarrazú.	24
Figura 5. Banda número 7 de la imagen RT_LC80150532016024LGN00 del satélite Landsat 8.	26
Figura 6. Polígono de corte (verde), cantón de Tarrazú (rojo), y corte de la banda 7 de la imagen RT_LC80150532016024LGN00 del satélite Landsat 8.	27
Figura 7. Áreas de entrenamiento para la imagen RT_LC80150532016024LGN00 del satélite Landsat 8 configurada en la combinación de bandas 5-4-3.	29
Figura 8. Clasificación de la imagen recortada RT_LC80150532016024LGN00 en formato raster (derecha), y formato vectorial (izquierda).	30
Figura 9. Clasificación de las imágenes recortadas RT_LC80150532016024LGN00 (izquierda), RT_LC80150532016040LGN00 (centro) y RT_LC80150532016088LGN00 (derecha), con las nubes y sombras de nubes eliminadas.	31
Figura 10. Unión de la clasificación de las tres imágenes utilizadas, correspondientes a las imágenes recortadas RT_LC80150532016024LGN00, RT_LC80150532016040LGN00 y RT_LC80150532016088LGN00.	32
Figura 11. Clasificación final con filtro de eliminación de áreas menores a 1000 m ²	32
Figura 12. Intersección de los puntos de validación y la clasificación del cantón de Tarrazú.	33
Figura 13. Tabla comparativa de los puntos de validación y la clasificación realizada del cantón de Tarrazú.	34



Figura 14. Combinación de bandas en la imagen recortada RT_LC80150532016024LGN00 del satélite Landsat 8 utilizada en el estudio.	40
Figura 15. Clasificación de la cobertura del cantón de Tarrazú, San José, Costa Rica, 2016.	42
Figura 16. Clasificación de la cobertura del distrito de San Marcos, Tarrazú, San José, Costa Rica, 2016.	44
Figura 17. Clasificación de la cobertura del distrito de San Lorenzo, Tarrazú, San José, Costa Rica, 2016.	46
Figura 18. Clasificación de la cobertura del distrito de San Carlos, Tarrazú, San José, Costa Rica, 2016.	48
Figura 19. Comparación de la clase nubes (blanco), con las imágenes originales utilizadas en la clasificación dispuestas en falso color infrarrojo.	51
Figura 20. Comparación de la clase agua (azul) de la clasificación realizada con la imagen RT_LC80150532016024LGN00 recortada ubicada en el embalse del proyecto hidroeléctrico Pirrís.	51

Tabla de cuadros

	Pág.
Cuadro 1. Características de las bandas disponibles en las imágenes Landsat 8, capturadas con el sensor OLI y TIRS.	8
Cuadro 2. Clases definidas por el Municipio de Miranda, Colombia para un análisis de cobertura.	12
Cuadro 3. Clases definidas para el Inventario Nacional Forestal, Costa Rica, 2013-2014.	13
Cuadro 4. Clases de cobertura utilizadas como línea base para el estudio de cobertura en el cantón de Tarrazú.	18
Cuadro 5. Características de las bandas utilizadas presentes en las imágenes Landsat 8, capturadas con el sensor OLI.....	25
Cuadro 6. Matriz de error de la clasificación de la cobertura del cantón de Tarrazú en el año 2016.	34
Cuadro 7. Área cubierta por las clases en hectáreas y su representación porcentual por distrito.....	49
Cuadro 8. Matriz de confusión resultante de la clasificación del cantón de Tarrazú 2016.	52

Tabla de anexos

	Pág.
Anexo 1. Modelo cartográfico de la descarga y transformación de las imágenes satelitales a la reflectancia de la superficie.	62
Anexo 2. Modelo cartográfico del corte de las 3 imágenes multibanda.....	63
Anexo 3. Modelo cartográfico de la unión de bandas 2,3,4,5,6 y 7 en las 3 imágenes satelitales Landsat 8.	64
Anexo 4. Modelo cartográfico de la creación de firmas a partir de las áreas de entrenamiento.	65
Anexo 5. Modelo cartográfico del proceso de clasificación de cobertura	66
Anexo 6. Modelo cartográfico de la aplicación del filtro a clasificación final y transformación a formato vectorial.	67
Anexo 7. Lista de participantes del Taller: Cobertura del suelo para el año 2016, del cantón de Tarrazú, San José, Costa Rica, realizado el martes 10 de enero del 2017.	68

1. Introducción

La cobertura del suelo se refiere a las formas de cubierta física, que se logra observar mediante vistas aéreas o por satélite, incluye la estructura y la vegetación natural o plantada (FAO, 2002), además esta definición ubica la infraestructura como parte de la cobertura física.

Según Laguna (2012), las coberturas del suelo son generadoras de información necesaria para crear mapas de vegetación, mejorar el ordenamiento territorial, determinar la tasa de deforestación, así como el porcentaje de cobertura boscosa. Sin embargo, algunas municipalidades del país, no cuentan con una clasificación de la cobertura de los territorios, que han sido delimitados políticamente, esto provoca que no se logre un adecuado ordenamiento territorial y planificación del desarrollo, que permita regular las actividades a nivel de cantón, provincia y país.

Los análisis de cobertura del suelo por medio de sistemas de información geográfica son una herramienta de gran ayuda para determinar la cobertura de la superficie terrestre de forma válida para un país o zona.

Por otra parte, en el país se han realizado estudios como el Inventario Nacional Forestal, donde se determinó que para el año 2013 la cobertura forestal cubría un 52,4 % del territorio nacional (SINAC, SIREFOR y MINAE, 2013); sin embargo, esta cobertura boscosa se encuentra amenazada por la presión que genera el sector agropecuario sobre el recurso forestal natural. Harvey, Alpízar, Chacón y Madrigal (2005) consideran la agricultura como la principal amenaza para la conservación de la biodiversidad en Centro América. Según Valenciano, (2008) en la zona de Los Santos predomina como medio de subsistencia el cultivo de Café por parte de las unidades familiares.

El presente trabajo tiene como objetivo general analizar la cobertura vegetal y de infraestructura ubicada en Tarrazú, San José, Costa Rica, con la finalidad de elaborar un mapa actualizado de la cobertura del cantón, que permita planificar u ordenar el uso del territorio disponible.



2. Objetivos

2.1 Objetivo general

Generar y transmitir información sobre la cobertura del suelo del año 2016 a los funcionarios de la Municipalidad de Tarrazú, San José.

2.2 Objetivos específicos

- Clasificar y validar la cobertura del suelo.
- Elaborar el mapa de cobertura del suelo.
- Transmitir los conocimientos y la información adquirida a los funcionarios de la municipalidad del cantón de Tarrazú.

3. Revisión de literatura

3.1 Cobertura del suelo

La cobertura del suelo hace referencia al aspecto morfológico y tangible del suelo. Comprende todos los aspectos que forman parte del recubrimiento de la superficie terrestre, de origen natural o cultural, que sean observados y permitan ser medidos con fotografías aéreas, imágenes de satélite u otros sensores remotos (GeoCVC, 2010).

Dentro de la cobertura del suelo se encuentra la cobertura vegetal, la cual se define como una cubierta biofísica observada sobre la superficie terrestre, que resulta de la asociación en el espacio y en el tiempo de elementos biológicos vegetales característicos, los cuales conforman unidades con propiedades estructurales y funcionales. La FAO (2010), describe el bosque maduro, bosque secundario, pastos y cultivos como cubiertas vegetales.

3.2 Teledetección

Según Pérez y Muñoz, (2006), la teledetección es cualquier procedimiento para adquirir información sin tener algún contacto de forma directa con ella. En el ámbito de las ciencias de la tierra, la teledetección es entendida como una técnica que tiene por objeto la obtención, procesamiento y análisis de imágenes digitales tomadas desde satélites artificiales donde existe una interacción de la energía electromagnética con las cubiertas terrestres, esta energía puede ser emitida de forma natural o artificial (Pérez y Muñoz ,2006).

3.3 Sensores remotos

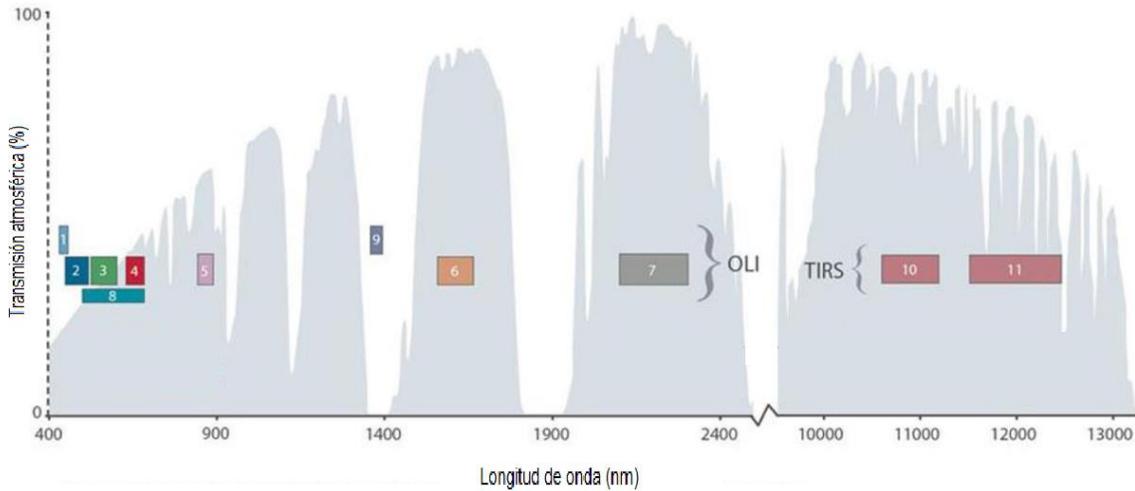
Los sensores remotos son sistemas o instrumentos para captar información de un objeto, área o fenómeno, a través del análisis de datos adquiridos mediante un dispositivo, el cual no está en contacto directo con lo que se está investigando. Los sensores son capaces de captar las relaciones espectrales y espaciales de objetos y materiales que se observan a una considerable distancia (Pérez, 2007).

Dentro de los sensores remotos, se encuentran los que producen imágenes satelitales, estos sensores representan un método de bajo costo y permiten evaluar grandes extensiones de terrenos o zonas remotas e inaccesibles (Wynne, Oderwald, Reams, Scrivani, 2000).

3.4 Espectro electromagnético

Se conoce como espectro electromagnético la distribución energética del conjunto de las ondas electromagnéticas. Estas ondas se manifiestan como radiación de energía que permiten identificar una sustancia o un tipo de material. Con los sensores remotos se caracterizan las ondas electromagnéticas en función de la posición en el espectro electromagnético, esta posición depende de la longitud, frecuencia y la energía de la onda (Frenzel, 2003). Las unidades más usadas para medir las longitudes de onda se extienden desde la radiación cósmica hasta las ondas de radio (Pérez, 2007).

Las ondas del espectro electromagnético utilizadas por el satélite Landsat 8 se encuentran en el espectro visible, infrarrojo cercano e infrarrojo como se muestra en la figura 1.



Fuente: (Ariza, 2013).

Figura 1. Paso de banda y longitud de onda para los sensores OLI y TIRS del satélite Landsat 8.

3.5 Formatos de archivos

En los Sistemas de Información Geográfica se utilizan básicamente dos formatos de archivos, los cuales permiten manejar la información de forma satisfactoria, estos formatos son raster y vectorial.

3.5.1 Raster

El formato raster es una malla de celdas las cuales tienen una misma dimensión, en cada celda solo se permite un atributo, por lo cual, si deseamos generar varios atributos en un mismo espacio, se debe crear una capa para cada atributo, aunque la estructura de datos es sencilla, se necesita más memoria para su manejo y el trabajo pierde estética al momento de establecer una representación gráfica (Burrough y McDonnell, 2000).

3.5.2 Vectorial

El formato vectorial es preciso cuando se necesita ubicar un punto, línea o polígono en el espacio y a este se le debe colocar diferentes atributos, esto genera una estructura de datos compleja que hace más lento el proceso de análisis de los datos, pero codifica de manera más eficaz las relaciones topológicas, esto se refiere a las propiedades de los cuerpos geométricos (Burrough, McDonnell, 2000).

3.7 Resolución de las imágenes satelitales

Según Sarría (2008), los diferentes tipos de resoluciones se definen de la siguiente forma:

3.7.1 Espacial

La resolución espacial de una imagen corresponde al objeto más pequeño que se puede distinguir en la imagen. Esta resolución está determinada por el tamaño del pixel, cuantificado en metros sobre el terreno. Por ejemplo, las bandas utilizadas del satélite Landsat 8 para el análisis tienen una resolución espacial de 30 x 30 metros.

3.7.2 Espectral

Consiste en el número de canales espectrales y su ancho de banda, que es capaz de captar el sensor. A mayor resolución espectral, se obtiene una separación más precisa entre distintos objetos por su comportamiento espectral.

3.7.3 Radiométrica

La resolución radiométrica se refiere a la cantidad de niveles de gris en que se divide la radiación recibida por los sensores, esto permite distinguir las pequeñas diferencias de radiación.

3.7.4 Temporal

Se define como la frecuencia de paso del satélite por un mismo punto de la superficie terrestre. Las imágenes Landsat 8 tienen una resolución temporal de 16 días.

3.8 Características de las imágenes Landsat 8

Estas imágenes están compuestas por 11 bandas con información de la reflectancia de las diferentes longitudes de onda del espectro electromagnético, de las cuales, 8 bandas tienen una resolución espectral de 30 metros, una banda de 15 metros y dos bandas de 100 metros, estas últimas capturadas mediante el sensor TIRS. Esta información se presenta en el cuadro 1.

Cuadro 1. Características de las bandas disponibles en las imágenes Landsat 8, capturadas con el sensor OLI y TIRS.

Landsat 8 Operational Land Imager (OLI)	Bandas	Longitud de onda (micrómetros)	Longitud de onda (nanómetros)	Resolución espectral (metros)
	Banda 1- Aerosol costero	0.43-0.45	430-450	30
	Banda 2- Azul	0.45-0.51	450-510	30
	Banda 3- Verde	0.53-0.59	530-590	30
	Banda 4- Rojo	0.64-0.67	640-670	30
	Banda 5- Infrarrojo cercano (NIR)	0.85-0.88	850-880	30
	Banda 6- SWIR 1	1.57-1.65	1570-1650	30
	Banda 7-SWIR 2	2.11-2.29	2110-2290	30
	Banda 8- Pancromático	0.50-0.68	500-680	15
	Banda 9- Cirrus	1.36-1.38	1360-1380	30
	Banda 10- Infrarrojo térmico (TIRS) 1	10.60-11.19	10600-11190	100
	Banda 11- Infrarrojo térmico (TIRS) 2	11.50-12.51	11500-12510	100

Fuente: (Ariza, 2013).

3.9 ArcGIS

a. Software

ArcGis es un conjunto de herramientas en el campo de los Sistemas de Información geográfica producido por ESRI, que agrupa varias aplicaciones para la captura, edición, análisis, tratamiento de información geográfica en formatos variados, como el formato raster y vectorial (ESRI, 2016).



b. Características

Este software permite administrar información, para realizar análisis espaciales, generando mapas avanzados, los cuales forman proyectos en sistemas de información geográfica, además permite el manejo de la información por múltiples personas.

3.10 QGIS

a. Software

Sistema de información Geográfica de código libre, generado por la fundación OSGeo, este software permite manejar formatos raster y vectoriales a partir de bases de datos generadas y bibliotecas.

b. Características

El software posibilita el soporte para la extensión espacial, manejo de archivos vectoriales en varios formatos como Shapefile, Arcinfo, Mapinfo, Grass Gis, entre otros, además tiene soporte para un importante número de formatos de archivos raster como lo son Grass Gis, GeoTIFF, TIFF, JPG, entre otros (Méndez, 2011).

Al manejarse como software libre permite trabajar libremente, se pueden generar funciones más especializadas adaptándose a las necesidades que exige el usuario en grupos más reducidos.

3.11 Reflectancia de la superficie

Los sensores miden la radiación, que se deriva de la luminosidad dada en dirección al sensor, útil para definir también la reflectancia como la relación entre la proporción reflejada y la energía total (Congedo, 2015).

3.12 Clasificación supervisada de imágenes satelitales

Se define como un proceso en que pixeles de identidad conocida, distribuidos dentro de áreas de entrenamiento, se utilizan para clasificar pixeles de identidad desconocida. La clasificación supervisada incluye las etapas de entrenamiento, selección del algoritmo de clasificación, la clasificación y operaciones después de la clasificación (Teledet, 2014).

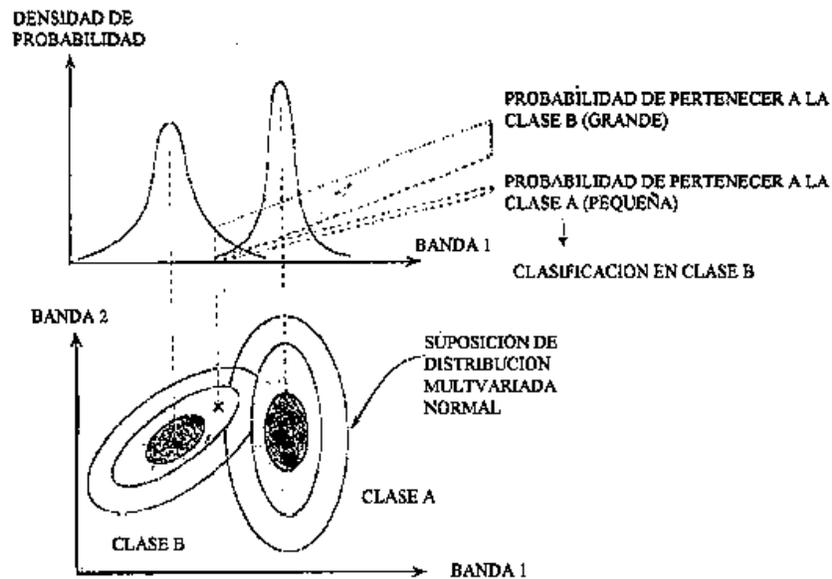
3.13 Firmas espectrales

La firma espectral es la forma en la cual un objeto refleja, emite o absorbe la energía que conforma un patrón espectral, se construye a partir de la señal registrada por los sensores en las diferentes porciones del espectro. Esta firma generada permite identificar y discriminar diferentes objetos de la naturaleza (Barrazza y Haydee, 2002).

3.14 Algoritmo de clasificación supervisada

El método de clasificación supervisada se utiliza en problemas en los cuales se conoce el número de clases y los patrones de cada clase, esto hace posible generar las áreas de entrenamiento.

El algoritmo por Máxima Probabilidad, es un algoritmo paramétrico que considera una distribución estadística particular para las clases consideradas en el estudio. Los parámetros utilizados como la media y la matriz de covarianza se obtienen de los datos de entrenamiento (Teledet, 2014). Este clasificador asigna cada pixel desconocido a una clase de acuerdo a un criterio Gaussiano de probabilidad, entre más amplia sea la campana en una clase, existe mayor probabilidad de que ingrese un pixel a esa clase como se muestra en la figura 2.



Fuente: (Teledet, 2014)

Figura 2. Ejemplificación de la probabilidad de pertenencia a una clase visualizada en la proyección de superficies en campana sobre el plano espectral generado por la banda 1 y 2.

3.15 Clases de cobertura

La definición de las clases a utilizar en un análisis de cobertura es de gran importancia para el estudio, pues debe tener relación con las imágenes satelitales y la información secundaria disponible, además estas clases deben corresponder a los objetivos planteados. Por ejemplo, la Alcaldía Municipal de Miranda Cauca, (2001), ubicado en el país de Colombia estableció las clases para un análisis de cobertura con el ordenamiento territorial como eje central, donde distribuyó cuatro unidades las cuales se descomponen en 10 clases como se observa en el cuadro 2

Cuadro 2. Clases definidas por el Municipio de Miranda, Colombia para un análisis de cobertura.

Unidad	Clase
Vegetal	Bosques
	Vegetación de Paramo
	Praderas
	Área Cultivada
Tierra Degradada	Tierras Eriales
Hídrica	Sistemas Lóticos
	Sistemas Lénticos
Construida	Zona Urbana
	Dispersa
	Sistema Vial

De la misma forma en Costa Rica se planteó generar un análisis de cobertura en el periodo 2013-2014, enfocado al sector forestal del país. En este planteamiento se establecen dos grandes clases, las cuales se derivan en 12 clases, (Sistema Nacional de Áreas de Conservación (SINAC) – Programa REDD-CCAD-GIZ, 2015), como se muestra en el cuadro 3.

Cuadro 3. Clases definidas para el Inventario Nacional Forestal, Costa Rica, 2013-2014.

Gran Clase	Clase
Bosque	Bosque maduro
	Bosque deciduo
	Bosque secundario
	Manglar
	SAF cultivos mixtos
	Plantación Forestal
	Bosque palmas
No bosque	Pastos
	Páramo
	No forestal
	Nubes
	Sombra de nubes

3.16 Análisis de la aleatoriedad de los datos

Para determinar la aleatoriedad de los datos se utiliza el estadístico Kappa (K_{hat}), el cual mide la diferencia entre el acuerdo mapa-realidad observado, y el que podría ser producto simplemente del azar. K_{hat} se calcula con la fórmula (Abraira, 2001):

$$K_{hat} = \frac{N * \sum_{i=1}^r x_{ii} - \sum_{i=1}^r (x_{i+} * x_{+i})}{N^2 - \sum (x_{i+} * x_{+i})}$$

donde:

r = Número de filas en la matriz

x_{ii} = Suma de observaciones en la fila i , y columna i (los valores en la diagonal mayor).

x_{i+} = Total de observaciones en la fila i (el total en la fila i a la derecha de la matriz).

x_{+i} = Total de observaciones en la columna i (total en la columna i debajo de la matriz).

N = Número total de observaciones o puntos de control usados en la validación

Un valor de $K_{hat} = 1$ indica un total acuerdo entre la clasificación hecha en el mapa y la realidad, mientras que un valor de 0 sugiere que los acuerdos en la clasificación mostrados en la diagonal mayor son producto del azar.

4. Materiales y métodos

4.1 Ubicación del área de estudio

Se denomina zona de los Santos al área compuesta por los cantones de Dota, León Cortez y Tarrazú. El estudio se desarrolló en el cantón Tarrazú, el cantón número cinco de la provincia de San José, Costa Rica. Geográficamente el sitio se encuentra entre las coordenadas 83°58'16" a 84°9'28" longitud oeste y 9°26'46" a 9°43'7" latitud norte. Tarrazú es el cantón número cinco de la provincia de San José, tiene una superficie de 297,5 km² con una población de 16280 (INEC, 2011). La principal actividad económica del cantón es la agricultura, específicamente el cultivo de café. La siguiente figura representa la ubicación del área de estudio y ubica los principales poblados e infraestructura vial presente.

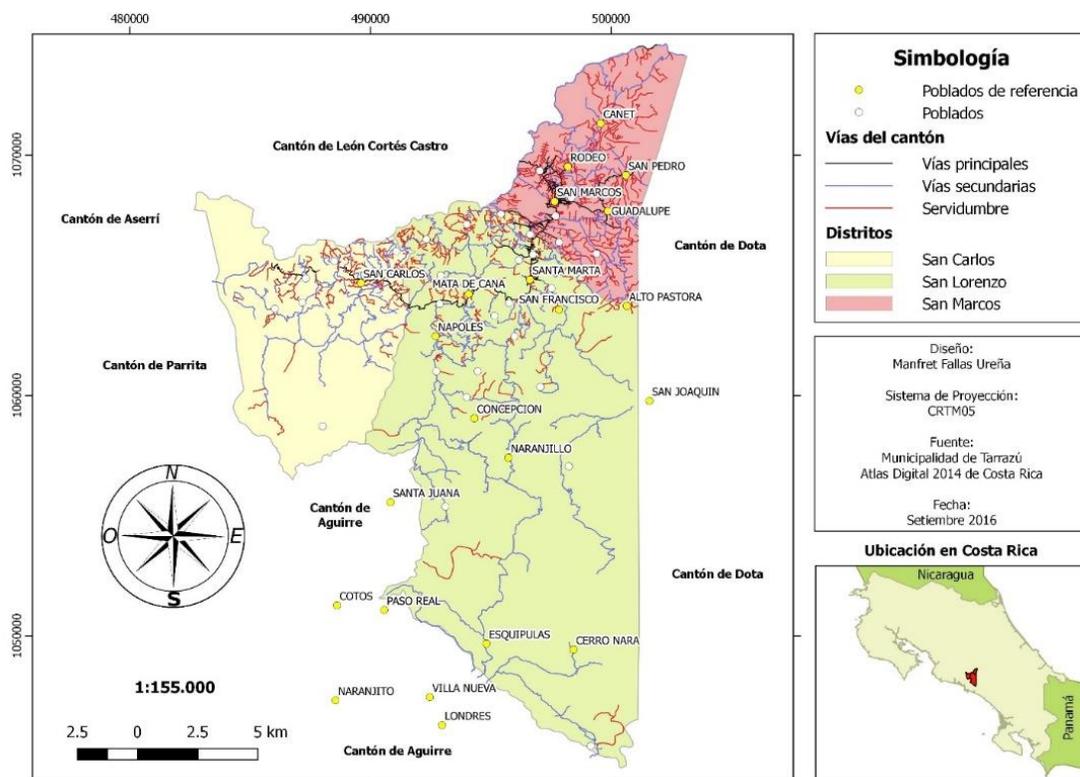


Figura 3. Ubicación geográfica del cantón de Tarrazú. San José, Costa Rica.

4.2 Datos recolectados en campo.

Los datos recolectados en campo describen las características y ubicación de la cobertura encontrada en las rutas planteadas para el estudio, estos datos fueron ubicados en el espacio con coordenadas, y reubicados al centro de la cobertura con el azimut y la distancia generada, esta reubicación permitió generar las áreas utilizadas como punto de comparación para el programa que realizó la clasificación, de esta forma el análisis de cobertura se desarrolló de forma más certera.

Los datos obtenidos en campo fueron los siguientes:

- a. Punto de ubicación: Este punto se tomó con un instrumento de posicionamiento global de marca GARMIN modelo OREGON 650, el cual estaba configurado con el sistema de proyección CRTM05, de uso oficial en Costa Rica. Se tomó un punto cada vez que la cobertura fue diferente según las clases propuestas y la cobertura contó con un área mínima de 900 m², pues la imagen satelital Landsat 8 que se utilizó tiene una resolución espacial de 30 x 30 metros en las bandas a utilizar en el estudio. Se tomó un mínimo de cincuenta muestras por cobertura.
- b. Coordenadas x, y: En el formulario de campo las coordenadas representadas con “x, y” se tomaron como respaldo, a los datos almacenados en el dispositivo de posicionamiento global.
- c. Distancia: La distancia se tomó de forma aproximada desde la zona donde se generó el punto con el instrumento de posicionamiento global en la vía pública hasta el centro de la cobertura identificada.
- d. Azimut: Se generó una medida en grados la cual ubica la dirección de la cobertura desde el punto generado con el instrumento de posicionamiento global. Esta medición se realizó con una brújula marca SUUNTO.

- e. Clase: Se identificó la clase a la cual pertenece cada cobertura. Las clases utilizadas fueron generadas al observar las coberturas presentes en los puntos visitados.
- f. Altura: El dato de la altura correspondió a la altura media estimada de la cobertura que se registra, por ejemplo, en un bosque secundario que presentó árboles y otro tipo de vegetación que están en un rango de 3 a 10 metros de altura, la altura media estimada de la cobertura fue de 6,5 metros.
- g. Densidad: La densidad estimada de la cobertura se valoró de forma visual, por ejemplo, un bosque maduro pudo alcanzar valores de un 80 al 90 % de densidad sin presentarse ningún tipo de alteración humana o eventos naturales, mientras que un pasto presentó valores de 0 a 10 %.
- h. Observaciones: Las observaciones generadas crearon seguridad en los datos, pues describían características específicas de la cobertura presente, o detalles de la ubicación del punto de referencia generado.
- i. Fotografía de la cobertura: Las fotografías ayudaron a dibujar las áreas de entrenamiento y a diferenciar los cambios entre tipos de coberturas presentes.

4.3 Clases de cobertura

La conceptualización de las clases de cobertura estuvo basada en las definiciones obtenidas del Sistema de Información de los Recursos Forestales de Costa Rica

Cuadro 4. Clases de cobertura utilizadas como línea base para el estudio de cobertura en el cantón de Tarrazú.

Clase	Subclase	Descripción
Bosque secundario		Estructura vertical de 3 a 4 estratos bien definidos. Dominan especies tolerantes a la sombra. Tiene de 100 a 400 años. Árboles de gran diámetro y altura. Con presencia de palmeras y zamias.
	I etapa	Estructura vertical no definida. Colonización inicial. Dominado por vegetación herbácea, helechos y gramíneas, se pueden observar muchos bejucos. Tiene de 1 a 5 años. Altura media menor a 5 m. No hay árboles sobresalientes.
	II etapa	Máximo 2 estratos verticales definidos. Bosque joven. Dominan especies pioneras de corta vida (ej.: <i>Croton</i> spp). Tiene de 5 a 20 años. Dosel arbóreo cerrado. Altura media entre 5 y 15 m. No hay árboles sobresalientes.
	III etapa	Máximo 3 estratos verticales definidos. Bosque maduro. Dominado por especies pioneras de larga vida. Tiene de 20 a 100 años. Más de 20 m de altura media. Sobresalen algunos árboles.
Bosque de palmas		Ej.: Bosque de yolillo

Clase	Subclase	Descripción
Humedal	Humedal	Área donde el suelo o sustrato está saturado periódicamente con o cubierto de agua. Puede presentar cobertura forestal o vegetación herbácea perenne.
	Manglar	Bosque pantanoso, se desarrolla en la mezcla de agua dulce con agua salada. Especies.: <i>Rhizophora</i> spp, <i>Avicennia</i> spp, <i>Laguncularia</i> sp, <i>Pelliciera</i> sp.
Pasto		Potreros (ganadería)
Pasto arbolado		Cobertura predominantemente de pastos con presencia de árboles por motivo de remanencia o regeneración natural.
Sistema agroforestal		Combinación que integra cultivos agrícolas, pastos con árboles mediante una distribución espacial sistemática.
Plantación forestal	Ej.: Teca, melina, ciprés, eucalipto.	Formación compuesta de árboles plantados, mediante una distribución sistemática.
Cultivo anual/intermitente	Ej.: Maíz, tomate, cebolla, papa, repollo, zanahoria.	Posee un ciclo de cosecha no mayor a 1 año, son realizados todos los años.
Cultivo perenne	Ej.: Café, cacao, caña de azúcar.	Cultivos de ciclo de cosecha largo. Presenta un ciclo mayor a 1 año, donde se obtienen varias cosechas continuas.
Infraestructura	Rural	Población de baja densidad, dedicada mayoritariamente a actividades agropecuarias. Ej.: casas-jardines.
	Urbana	Población de alta densidad, desarrollan actividades industriales y comerciales.
Agua	Lago, embalse, río, mar.	
Suelo desnudo		No presenta cobertura vegetal, ni uso urbano.

Después de realizar el análisis de la información obtenida en campo y en la revisión bibliográfica, se procedió a generar una lista de las clases y sus definiciones, según la situación registrada en la cobertura del cantón de Tarrazú. A continuación, se muestran las definiciones de las clases utilizadas en la clasificación.

4.3.1 Bosque maduro

Es un ecosistema boscoso fruto de un proceso de sucesión que se ha mantenido ininterrumpido durante 75-100 o más años, compuesto por especies nativas de árboles. La estructura vertical contiene de 3 a 4 estratos bien definidos. Dominan especies tolerantes a la sombra. El bosque maduro puede estar afectado por fenómenos climáticos o por actividades extractivas de subsistencia.

4.3.2 Bosque secundario

Tierra con vegetación leñosa de carácter sucesional secundario que se desarrolló una vez que la vegetación original fue eliminada por actividades humanas o fenómenos naturales, además tiene una estructura vertical no definida o máximo 3 estratos. Presencia de especies pioneras como *Croton* spp, helechos, bejucos entre otras.

4.3.3 Pasto

Áreas cubiertas por pastos herbáceos, carentes de cobertura forestal o con una cobertura menor al 10%

4.3.4 Cultivo perenne (café)

Cultivo de ciclo de cosecha largo. Presenta un ciclo de vida mayor a 1 año, donde se cosecha una vez por año, además este cultivo presenta una siembra sistemática en hileras perpendiculares a la pendiente, las cuales, en media y alta pendiente, se cultiva con el método de curvas de nivel.

4.3.5 Infraestructura

Esta clase está definida por estructuras de habitación humana o estructuras que desarrollan actividades industriales y comerciales, además incluye vías principales de acceso al área de estudio.

4.3.6 Nubes

Masa visible conformada de gotas de agua suspendidas en la atmosfera.

4.3.7 Agua

Esta clase se conformó por el embalse del Proyecto Hidroeléctrico Pirrís.

4.4 Rutas para la toma de datos

Se planificó el avance para la toma de datos en los tres distritos del cantón de Tarrazú, los cuales son: San Lorenzo, San Carlos y San Marcos, este último es la cabecera del cantón y presenta el mayor desarrollo a nivel de infraestructura comercial. Se utilizaron los caminos principales y secundarios de la capa de vías 2013 disponible en la Municipalidad de Tarrazú. (Figura 3).

La recolección de los datos se inició en el sector norte del cantón el cual pertenece al distrito de San Marcos, se continuó con el distrito de San Carlos, hasta terminar en el sector sur, perteneciente al distrito de San Lorenzo.

El recorrido en el distrito de San Marcos se hizo caminando y en los distritos de San Lorenzo y San Carlos fue realizado en vehículo. Este recorrido se realizó por las vías principales y secundarias del cantón, en las cuales se procedió a ubicar cada cambio de cobertura. De esta forma se generó un nuevo dato con el GPS, se estimó la distancia y se obtuvo el azimut del camino hasta el punto central de la cobertura, también se recolectó la clase, altura, densidad, observaciones y se tomó una fotografía de la cobertura.

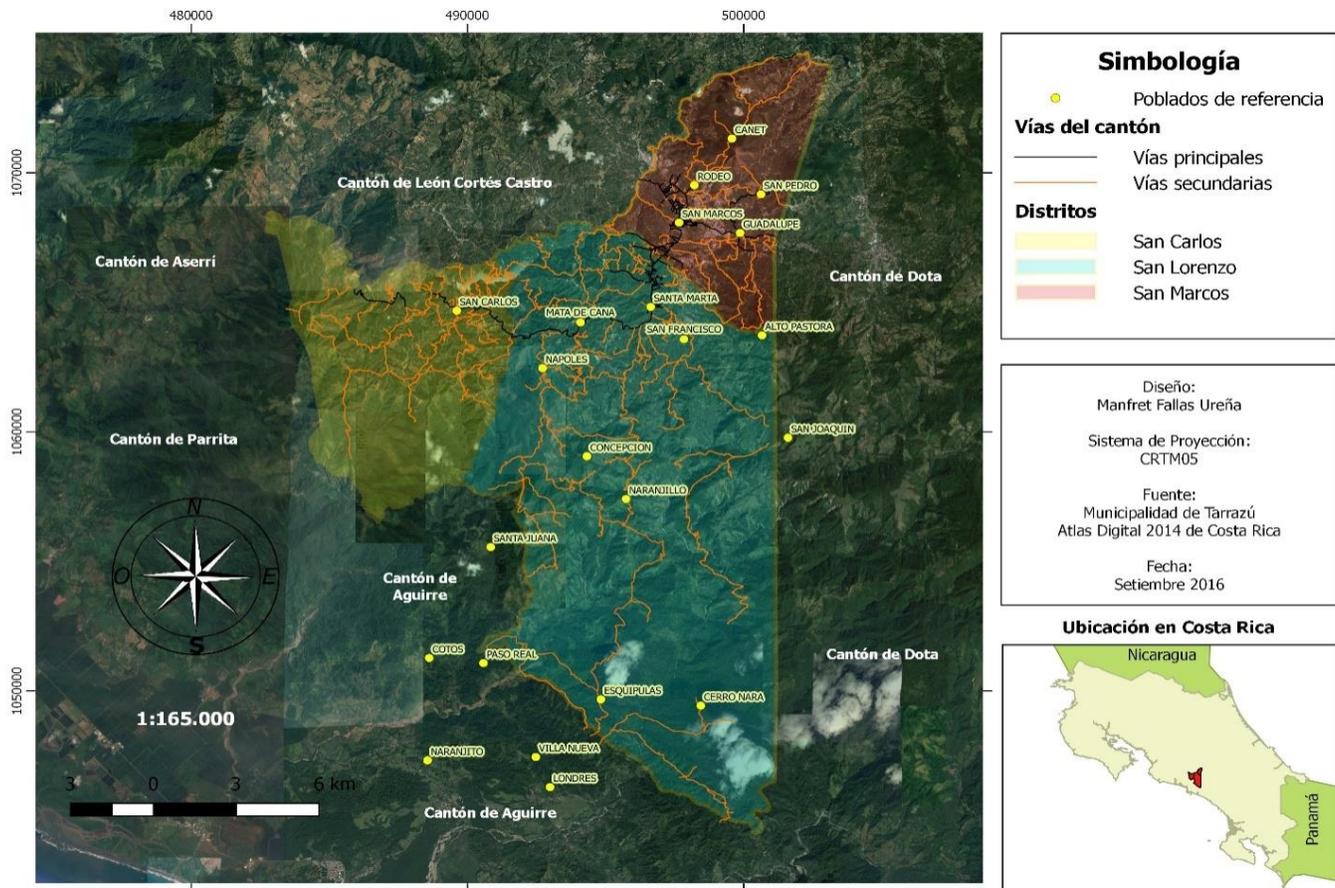


Figura 3. Distribución de vías primarias y secundarias en el cantón de Tarrazú.

4.5 Secuencia del pre-proceso y proceso de clasificación de la cobertura para el cantón de Tarrazú

En la figura 4, se observa los pasos para desarrollar la clasificación de la cobertura final del área de estudio y su correspondiente validación mediante una matriz de error, además en los anexos 1,2,3,4,5, y 6 se muestran los modelos cartográficos utilizados en el proceso de clasificación.

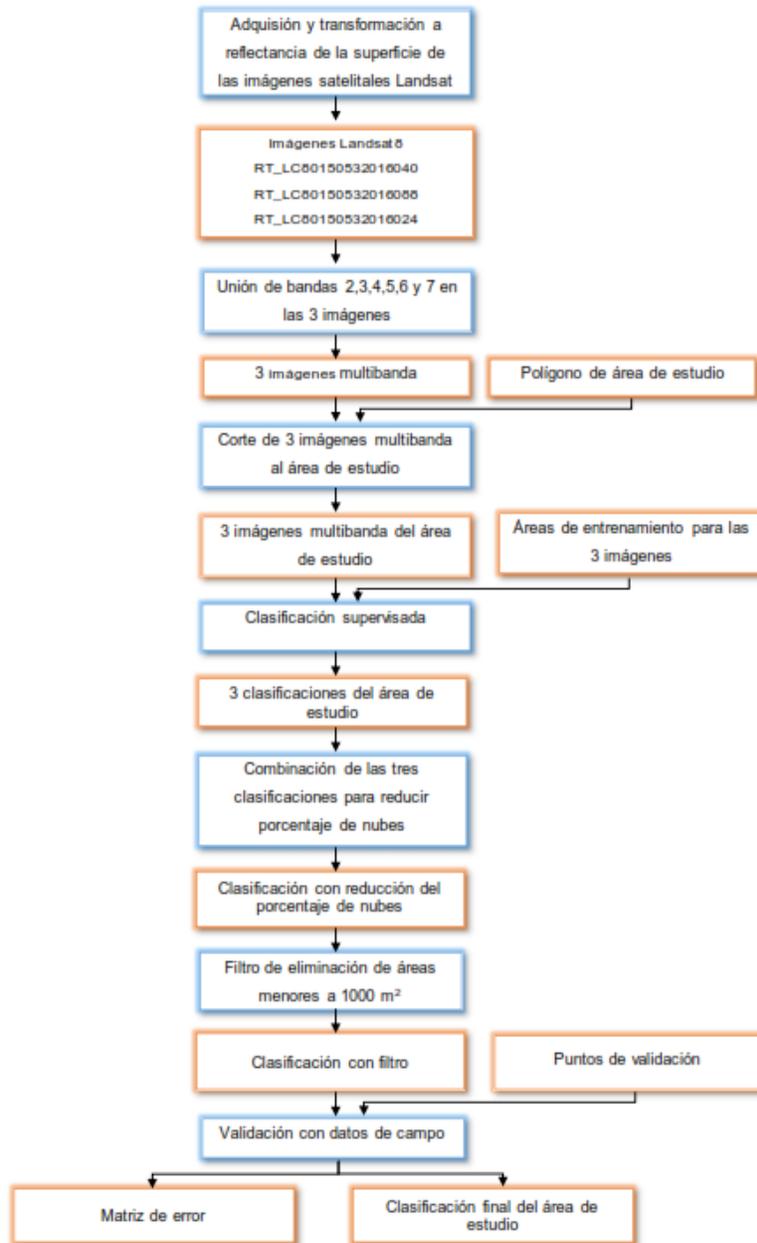


Figura 4. Secuencia del pre-proceso y proceso de clasificación de la cobertura para el cantón de Tarrazú.

4.6 Selección y adquisición de imágenes.

La selección se realizó mediante el geoportal de imágenes satelitales del Servicio Geológico de los Estados Unidos (<http://earthexplorer.usgs.gov/>), se encontró imágenes del año 2016 que incluían el área de estudio con alguna presencia de

nubes, estas imágenes se obtuvieron mediante el plugin semiautomatic classification de QGIS en la sección descarga de imágenes Landsat.

Las bandas utilizadas de las imágenes Landsat y sus principales características se presentan en el cuadro 5.

Cuadro 5. Características de las bandas utilizadas presentes en las imágenes Landsat 8, capturadas con el sensor OLI.

Landsat 8 Operational Land Imager (OLI)	Bandas	Longitud de onda (micrómetros)	Longitud de onda (nanómetros)	Resolución espectral (metros)
	Banda 2- Azul	0.45-0.51	450-510	30
	Banda 3- Verde	0.53-0.59	530-590	30
	Banda 4- Rojo	0.64-0.67	640-670	30
	Banda 5- Infrarrojo cercano (NIR)	0.85-0.88	850-880	30
	Banda 6- SWIR 1	1.57-1.65	1570-1650	30
	Banda 7-SWIR 2	2.11-2.29	2110-2290	30

Fuente: Ariza (2013).

Como criterios de selección de las imágenes se utilizó el porcentaje de nubes, no mayor al 50 %, pues el área de estudio presenta nubosidad gran parte del año, sin embargo al no encontrar una imagen libre de nubes, se seleccionaron tres imágenes del año 2016, con las cuales se logró clasificar el mayor porcentaje del área de estudio. Además, las imágenes fueron capturadas por los sensores en el día. Las imágenes utilizadas fueron las siguientes:

- a. RT_LC80150532016040LGN00
- b. RT_LC80150532016088LGN00
- c. RT_LC80150532016024LGN00

Estas imágenes estaban transformadas a la reflectancia de la superficie (RT), combinan los sensores OLI y TIRS (C), y su captura se realizó en el año 2016 en



las siguientes fechas que concuerdan con el orden anterior: 10 de mayo, 24 de enero y 28 de marzo.

4.7 Pre-procesamiento de imágenes LANDSAT 8.

El pre-procesamiento se realizó con el software QGIS 2.14.7 para las tres imágenes satelitales Landsat 8 seleccionadas.

4.8 Descarga y conversión de las bandas a la reflectancia de la superficie.

Las seis bandas utilizadas se transformaron a la reflectancia de la superficie de forma automática al descargarlas utilizando la extensión “descargar imágenes Landsat” del plugin “semiautomatic classification” del software QGIS 2.14.7. Esto permitió obtener los valores verdaderos de la reflectancia de los distintos tipos de cobertura del suelo.

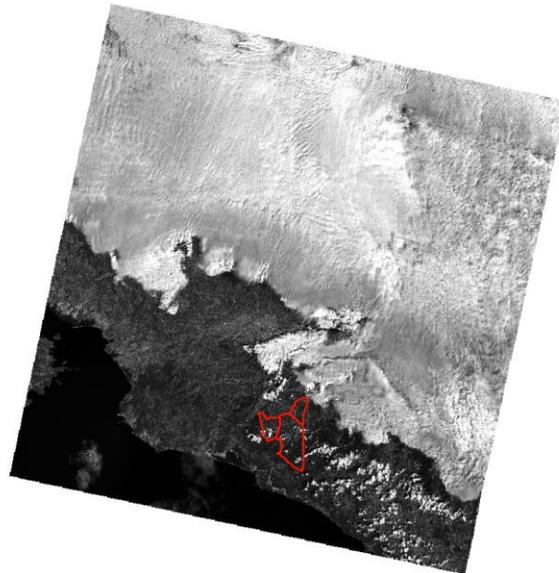


Figura 5. Banda número 7 de la imagen RT_LC80150532016024LGN00 del satélite Landsat 8.

4.9 Corte de bandas de las imágenes Landsat 8.

Se procedió a generar un polígono de forma rectangular que abarcó el cantón de Tarrazú, excediendo en 500 metros los puntos más extremos, esto con el fin de disminuir el área a clasificar. Para crear este polígono se generó un archivo de formato shape en el sistema de proyección CRTM05, al cual se le agregó un objeto con las características antes mencionadas. Con este polígono se cortaron las seis bandas propuestas a utilizar en el análisis. En la figura 6 se representa el polígono rectangular que cubre en totalidad al cantón de Tarrazú y la banda número siete de la imagen RT_LC80150532016024LGN00 que ejemplifica el proceso realizado a las bandas de las tres imágenes utilizadas.

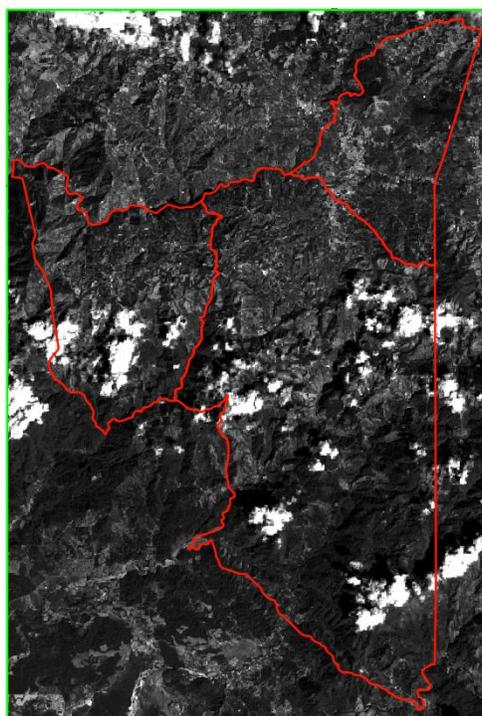


Figura 6. Polígono de corte (verde), cantón de Tarrazú (rojo), y corte de la banda 7 de la imagen RT_LC80150532016024LGN00 del satélite Landsat 8.

4.10 Crear el conjunto de bandas de las imágenes Landsat 8 (Band set).

A partir de las bandas ya cortadas, se generó una sola imagen, se utilizó de la banda dos a la siete, con las imágenes resultantes, se pudo observar en color verdadero o falso color, y otras combinaciones, facilitando la identificación de las distintas coberturas que se presentan en el área. Este proceso se realizó mediante el software ArcGIS 10.1, con la extensión de “Composición de bandas” de las herramientas raster.

4.11 Clasificación de la cobertura del suelo.

El proceso completo de la clasificación de la cobertura del suelo se realizó mediante el análisis de imágenes satelitales Landsat 8 con una resolución espacial de 30 metros. Esta clasificación se ejecutó mediante el software ArcGIS 10.1 con el conjunto de herramientas “Spatial Analyst”.

4.11.1 Áreas de entrenamiento

Con los puntos recolectados en campo se procedió a dibujar con ayuda de las imágenes las áreas de entrenamiento para las diferentes clases de cobertura, se creó un archivo de formato shape con el sistema de proyección CRTM05, en la tabla de atributos de este archivo se agregó un identificador numérico consecutivo, un identificador numérico por clase y un identificador textual por clase.

Según el área de entrenamiento que se dibujó, la imagen se configuró a una determinada combinación de bandas, para facilitar la determinación de los bordes de la cobertura que se identificaba, este proceso de dibujo de las áreas de entrenamiento se acompañó de la visualización de la imagen satelital disponible en los mapas de google.

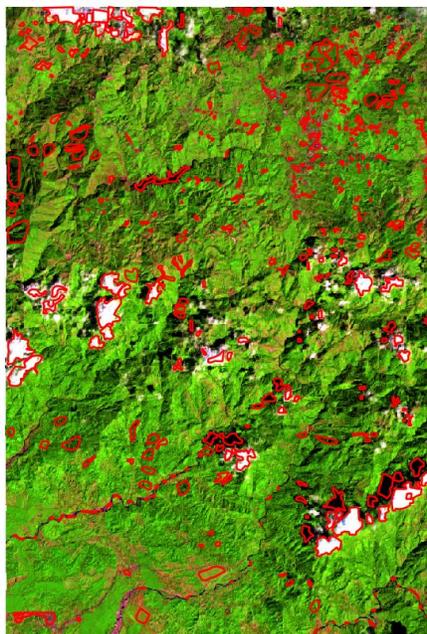


Figura 7. Áreas de entrenamiento para la imagen RT_LC80150532016024LGN00 del satélite Landsat 8 configurada en la combinación de bandas 5-4-3.

4.11.2 Firmas espectrales

A partir de las áreas de entrenamiento se creó el archivo de las firmas espectrales mediante la extensión “Crear firmas” del software ArcGIS 10.1, en este proceso se generó un archivo ASCII conocido como archivo de texto plano, en este registro se almacenó información de las clases definidas acompañadas de datos de las imágenes compuestas referentes a valores en el espectro electromagnético de las diferentes bandas.

4.11.3 Aplicación del algoritmo de clasificación

Se aplicó el algoritmo de clasificación de máxima verosimilitud, se utilizó el conjunto de bandas recortado y el archivo de firmas creado para las clases descritas. Este algoritmo generó un archivo de formato raster el cual contiene una trama clasificada.

Esta trama en formato raster fue convertida a formato shape en un archivo tipo vectorial, con esto se facilitó el manejo y configuración. En la figura 8 se observa la representación gráfica de ambos formatos.

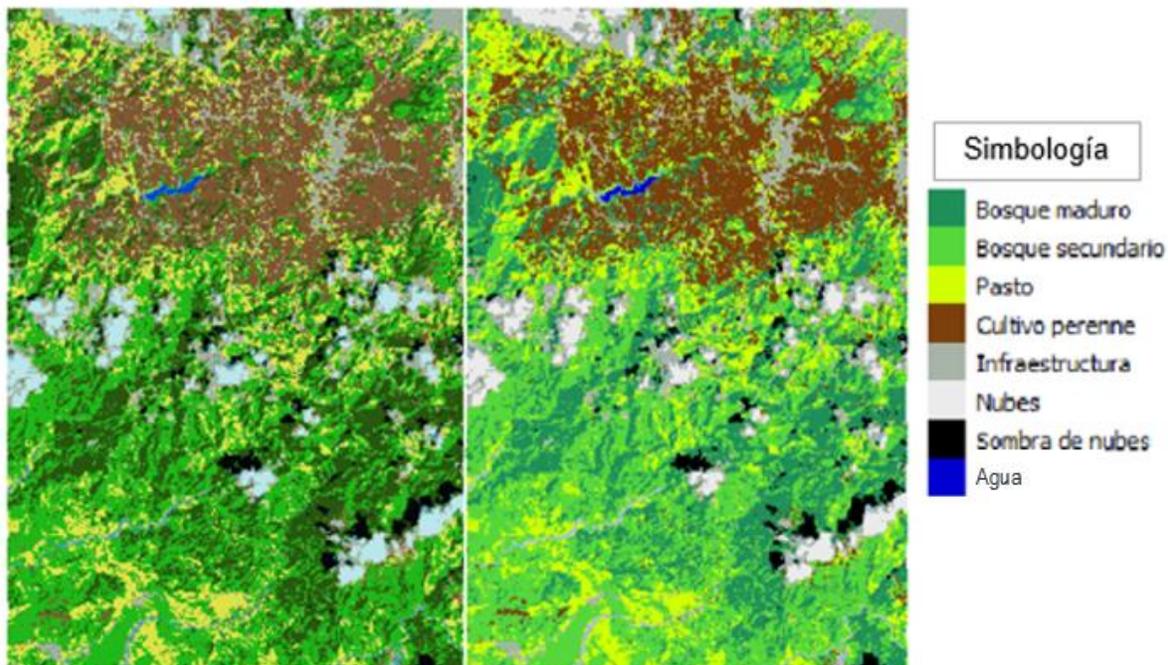


Figura 8. Clasificación de la imagen recortada RT_LC80150532016024LGN00 en formato raster (derecha), y formato vectorial (izquierda).

4.11.4 Unión de las tres imágenes Landsat 8 utilizadas.

Con las tres clasificaciones en formato vectorial se procedió a buscar la que tuviera un menor porcentaje de nubes para establecerla como clasificación base en la unión. Se utilizó la clasificación de la imagen RT_LC80150532016024LGN00, a partir de las nubes y sombras de nubes de esta clasificación, se creó una capa de corte para obtener la clasificación de la cobertura de las dos imágenes restantes, obteniendo una reducción en las nubes presentes de la clasificación final (Figuras 9 y 10).

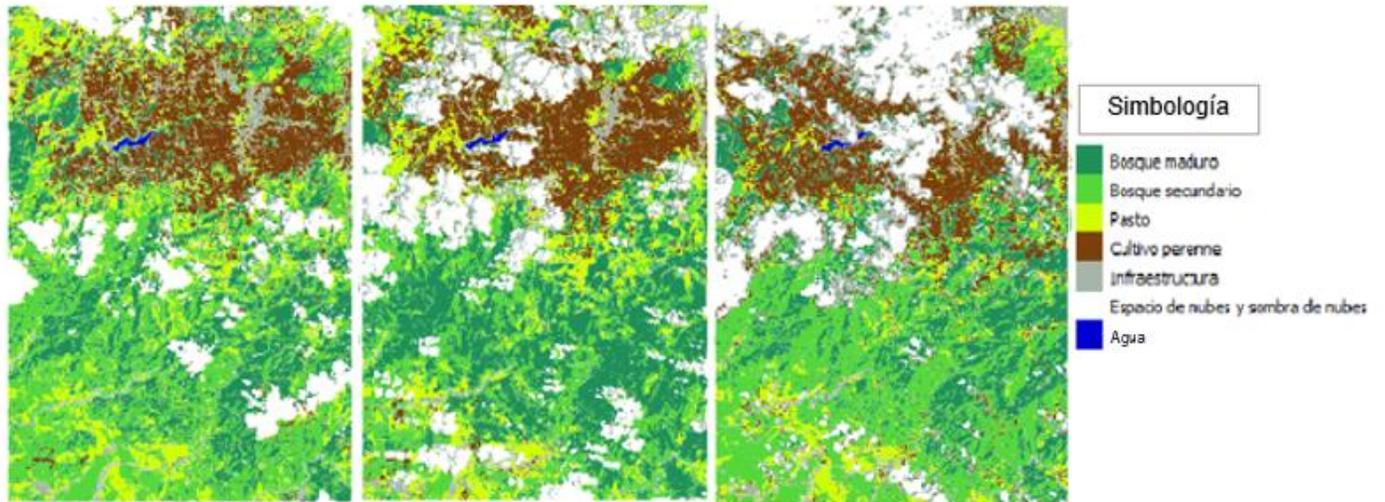


Figura 9. Clasificación de las imágenes recortadas RT_LC80150532016024LGN00 (izquierda), RT_LC80150532016040LGN00 (centro) y RT_LC80150532016088LGN00 (derecha), con las nubes y sombras de nubes eliminadas.

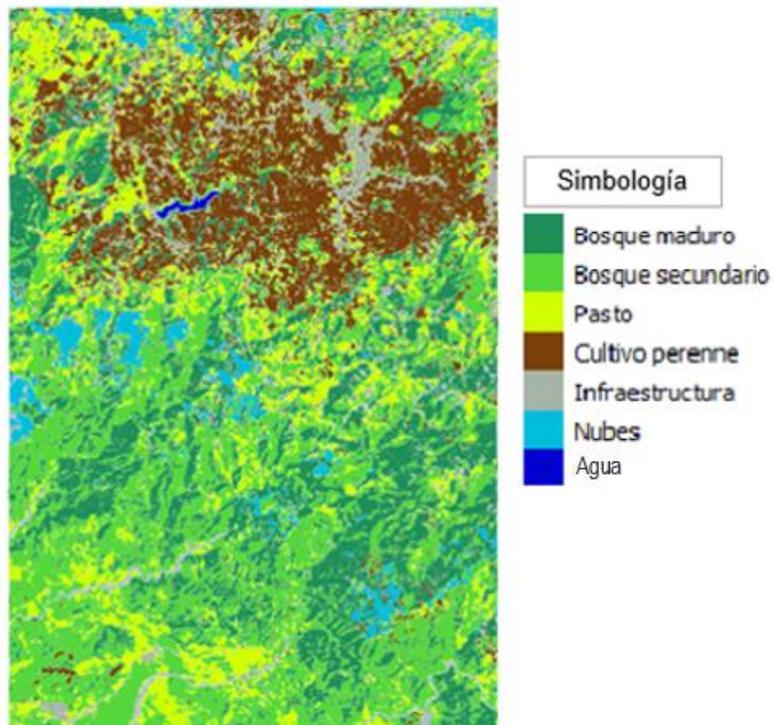


Figura 10. Unión de la clasificación de las tres imágenes utilizadas, correspondientes a las imágenes recortadas RT_LC80150532016024LGN00, RT_LC80150532016040LGN00 y RT_LC80150532016088LGN00.

4.11.5 Aplicación de filtro

Con la clasificación final se procedió a eliminar los polígonos inferiores a 1000 metros cuadrados, los cuales pasaron a hacer parte de los polígonos vecinos, esto se hizo mediante la extensión “Eliminar” de la herramienta “Gestión de datos” del software ArcGIS 10.1. El resultado se observa en la figura 11.

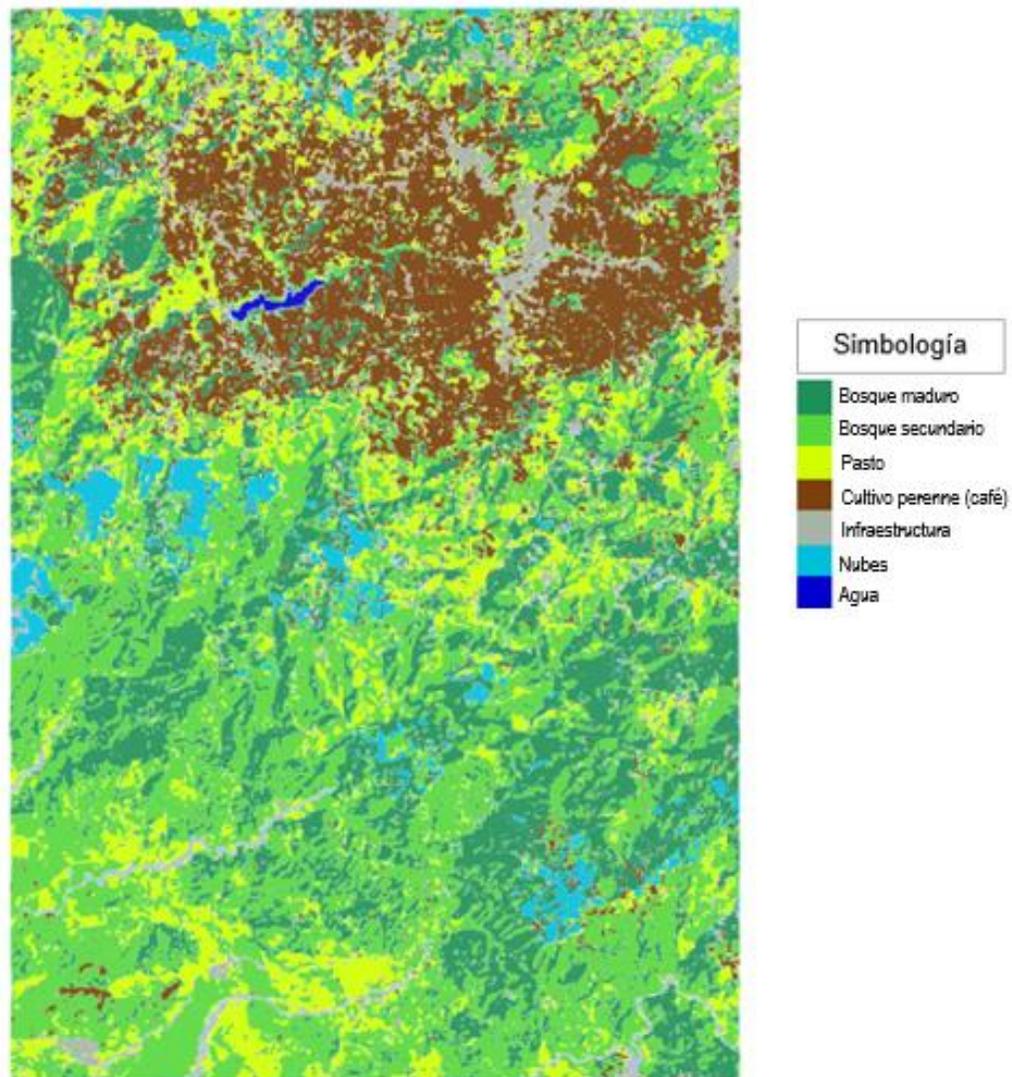


Figura 11. Clasificación final con filtro de eliminación de áreas menores a 1000 m².

4.12 Validación de la clasificación de la cobertura.

Con la clasificación actualizada de la cobertura se procedió a realizar la validación de las coberturas, esto permitió demostrar que se generó una clasificación acorde con la cobertura presente en campo, esta validación se realizó de dos formas las cuales fueron las siguientes:

4.12.1 Comparación con datos tomados en campo

Esta comparación la realizó una persona externa a la clasificación, efectuada con puntos generados en campo, estos puntos no se utilizaron en la clasificación supervisada, y permitieron la verificación de la cobertura generada, la cual consistió en revisar la clasificación obtenida y la registrada en la toma de datos.

Al tener la capa de puntos de validación y la capa de la clasificación realizada, se procedió con el software QGIS a procesar la información.

De forma inicial se ejecutó una intersección entre la capa de puntos de validación y la capa de la clasificación como se observa en la figura 12.

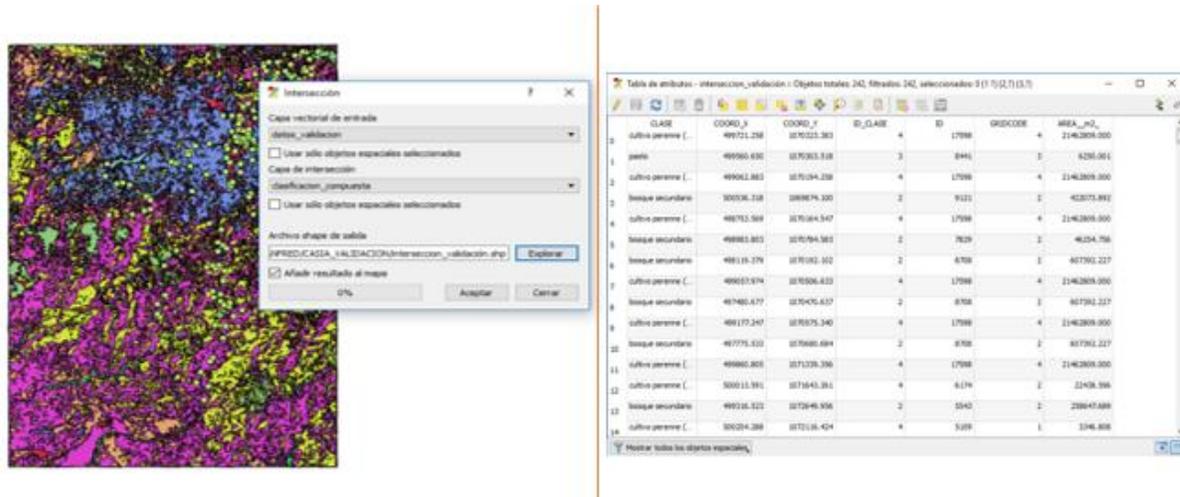


Figura 12. Intersección de los puntos de validación y la clasificación del cantón de Tarrazú.

Con la intersección de ambas capas, se procedió a interpretar los datos con el software Excel del paquete libre de Office representado en la figura 13, es así como se obtuvo la tabla comparativa de lo existente en campo y lo obtenido en la clasificación.

	A	B	C	D	E	F	G
1	CLASE_VALIDACION	X	Y	ID_VALIDACION	ID_CLASIFICADA	IGUAL	
2	cultivo perenne (café)	499721,258	1070323,383	4	4	VERDADERO	
3	pasto	499560,650	1070303,518	3	3	VERDADERO	
4	cultivo perenne (café)	499062,883	1070194,258	4	4	VERDADERO	
5	bosque secundario	500536,318	1069874,100	2	2	VERDADERO	
6	cultivo perenne (café)	498753,569	1070164,547	4	4	VERDADERO	
7	bosque secundario	498983,803	1070784,583	2	2	VERDADERO	
8	bosque secundario	498119,379	1070192,102	2	2	VERDADERO	
9	cultivo perenne (café)	499057,974	1070506,633	4	4	VERDADERO	
10	bosque secundario	497480,677	1070470,637	2	2	VERDADERO	
11	cultivo perenne (café)	499177,247	1070575,340	4	4	VERDADERO	
12	bosque secundario	497775,533	1070680,684	2	2	VERDADERO	
13	cultivo perenne (café)	499860,805	1071339,356	4	4	VERDADERO	
14	cultivo perenne (café)	500013,591	1071643,261	4	2	FALSO	
15	bosque secundario	499316,523	1072649,956	2	2	VERDADERO	
16	cultivo perenne (café)	500204,288	1072116,424	4	1	FALSO	
17	bosque secundario	499391,961	1072562,679	2	2	VERDADERO	
18	pasto	500190,552	1073052,433	3	3	VERDADERO	
19	bosque secundario	501336,441	1072227,791	2	2	VERDADERO	
20	infraestructura	500395,624	1072765,636	5	5	VERDADERO	
21	bosque secundario	500756,645	1072720,384	2	2	VERDADERO	
22	pasto	500627,084	1072235,171	3	3	VERDADERO	

Figura 13. Tabla comparativa de los puntos de validación y la clasificación realizada del cantón de Tarrazú.

Esta validación finalizó con la creación de una matriz de error o tabla de contingencia, mediante la función tabla dinámica (Cuadro 6), en la cual se colocan las clases y datos de campo usados en la comprobación, en las columnas. En las filas se ubican los datos de campo y los datos generados en el análisis. La diagonal mayor mostro el número de puntos de muestreo correctamente clasificados. Todos los datos fuera de la diagonal se expresan como errores de clasificación, estos errores se denominan errores de exclusión y de inclusión.

Además, con la matriz de error se calculó la exactitud de la clasificación en total y por cada clase.

Cuadro 6. Matriz de error de la clasificación de la cobertura del cantón de Tarrazú en el año 2016.

CLASES	BM	BS	Pasto	C P(café)	Infraestructura	TOTAL
Bosque maduro						
Bosque secundario						
Pasto						
Cultivo perenne (café)						
Infraestructura						
TOTAL						

4.12.2 Análisis de aleatoriedad de los datos

Para calcular la aleatoriedad de los resultados se utilizó el estadístico Kappa (K_{hat}).

4.13 Taller: Transferencia de información a funcionarios de la Municipalidad de Tarrazú.

El taller fue dirigido al personal de los departamentos de Catastro, Unidad Técnica de Gestión Vial, Desarrollo Urbano y Acueducto. Este Taller se realizó en el Salón de sesiones de la Municipalidad de Tarrazú, el día martes 10 de enero del año 2017, inició a las 14:00 horas y finalizó a las 16:00 horas. Además, se llenó la lista de asistencia ubicada en el anexo 8. En el taller se contó con proyector, computadora y hojas blancas como material de trabajo disponible.

El taller se dividió en dos secciones, la primera sección consistió en explicar el proceso realizado para obtener la información y los resultados obtenidos a nivel cantonal y distrital. Se hizo énfasis en las conclusiones generadas y se establecieron algunas posibles acciones a desarrollar con la información obtenida, las cuales tenían la intención de generar una apertura para la segunda sección, además se dio la oportunidad de consultas al finalizar la explicación. Esta sección tuvo una duración aproximada de una hora.

En la segunda sección se realizó una actividad la cual se componía de dos partes. Como primera parte de la actividad se invitó a los participantes a realizar propuestas de estudios, evaluaciones o tareas diarias en las cuales los resultados presentados pueden ser de utilidad, esta sección se ejecutó de manera individual y las propuestas se realizaron de forma general para la implementación de la municipalidad y de forma individual por departamento, se brindó un tiempo de 20 minutos para realizar las anotaciones pertinentes.

La segunda parte de la actividad consistió en la exposición de las propuestas por parte de cada participante, de esta forma el expositor principal del taller pudo intervenir y aclarar dudas de la forma correcta del uso de la información. Esta segunda parte tuvo una duración aproximada de 30 minutos.

Como cierre del taller el expositor principal realizó algunas recomendaciones más profundas según los resultados obtenidos, y explicó la forma de entrega a la municipalidad de la información obtenida.

5. Resultados y discusión

5.1 Datos de campo

Al recolectar los datos de campo, se determinó que algunas de las clases presentadas como posibles en el cuadro 4 de la metodología, no eran bien representadas en el sitio, por lo tanto no fueron utilizadas. A continuación, se explica el motivo:

- **Bosque de palmas:** En el cantón de Tarrazú no existe este tipo de bosque, por lo cual se descartó del estudio.
- **Humedales:** La presencia de humedales en el área de estudio es nula, por esto se descartó del análisis.
- **Pasto arbolado:** Las áreas ubicadas de pastos en combinación con árboles, fueron observadas, pero en áreas menores a una hectárea o las mismas contaron con una presencia arbórea por debajo del 10% de densidad, es por esto que esta clase se incluyó en la clase pastos.
- **Sistema agroforestal:** Se identificó áreas de sistemas agroforestales, sin embargo, la cantidad de muestras y el tamaño de la muestra no fueron suficientes para generar una clase, el sistema agroforestal observado fue el cultivo de café en combinación con cedro, específicamente la especie *Cedrela odorata*. Esta clase se clasificó como bosque secundario, por la similitud en la reflectancia, que se puede deber a la alta densidad de las copas que presentaron las áreas observadas.
- **Plantación forestal:** La clase plantación forestal fue encontrada solo en dos sectores, contabilizando en total dos muestras, por lo tanto la clase no se incluyó en el análisis, las áreas de esta cobertura fueron ubicadas en la clase bosque secundario.
- **Cultivo anual/intermitente:** La presencia de estos cultivos en el área de estudio era muy reducida con áreas inferiores a los 200 m² aproximadamente, lo cual limitó utilizar esta clase en el estudio.

- **Suelo desnudo:** Las áreas sin cobertura vegetal o de infraestructura, son casi nulas en el cantón de Tarrazú, con la excepción de algunos tajos y deslizamientos, sin embargo, no alcanzan el área necesaria para ser utilizadas como áreas de entrenamiento en el estudio.

5.1 Composición de la imagen multibanda

La imagen multibanda permitió configurar la representación gráfica, intercambiando las diferentes bandas en el modelo RGB. Este modelo hace referencia a los colores primarios: rojo, verde y azul en términos de la intensidad (Lillesand, Kiefer y Chipman, 2015), de esta forma, según las bandas seleccionadas, se asignan los colores que se representan.

Hay ciertas combinaciones que nos ayudaron a diferenciar la vegetación, infraestructura, cuerpos de agua y nubes al momento de concretar las áreas de entrenamiento para el análisis de cobertura, tal como se observa en la figura 14. Además, Butler, (2013) señala que combinaciones como la Color natural o Infrarrojo permiten intervenir en temas ambientales y agronómicos.

Las siguientes combinaciones de bandas fueron generadas en el proceso de creación de áreas de entrenamiento como parte de la investigación realizada en búsqueda de obtener los mejores resultados en la clasificación. Los números de las combinaciones corresponden al número de banda original.

a. RGB (4,3,2) Color natural

En la combinación color natural la vegetación se expresó en diferentes tonos de verde y los suelos e infraestructura en colores marrones. Además, las bandas visibles tuvieron buena penetración en los cuerpos de agua lo que permitió determinarlos con facilidad. Resultados similares encontraron otros autores como Fernández y Herrero (2005), al involucrar las tres bandas visibles y generar una

imagen color verdadero, una combinación que se aproxima a los colores naturales de la imagen.

b. RGB (6,5,4) Simulación del color natural

La combinación 6,5,4 generó una simulación del color natural, donde el color verde de la vegetación se ve con mayor contraste, lo que permitió diferenciar tipos de vegetación. Este mayor contraste de coberturas fue posible al utilizar una banda del infrarrojo cercano y otra ubicada en el infrarrojo. Esta combinación permitió el análisis de vegetación.

c. RGB (5,4,3) Falso color infrarrojo

Esta combinación resultó similar a los colores obtenidos de la imagen captada con el infrarrojo, los tonos rojos a rosados correspondieron a vegetación, desde la vegetación densa con tonos oscuros, hasta cultivos con tonos claros. El azul-celeste representó de forma correcta la infraestructura, esto incluye casas, comercio, industria y vías principales. El azul oscuro a negro se relacionó con agua clara o cuerpos de agua como embalses o lagunas. Resultados similares son descritos por Vivancos, Grau, Llastarri y Vivancos, (2005) los cuales indican que los bosques se observan en rojo, las zonas cultivadas en tonos de rojo y rosa, los lagos y el mar se representan de color azul en la combinación de falso color infrarrojo.

d. RGB (5,6,4) Infrarrojo cercana

A diferencia de la combinación anterior, en esta se obtuvo un realce de la variación de humedad en suelos y áreas vegetales, esto permitió diferenciar entre suelo y agua con mayor facilidad.

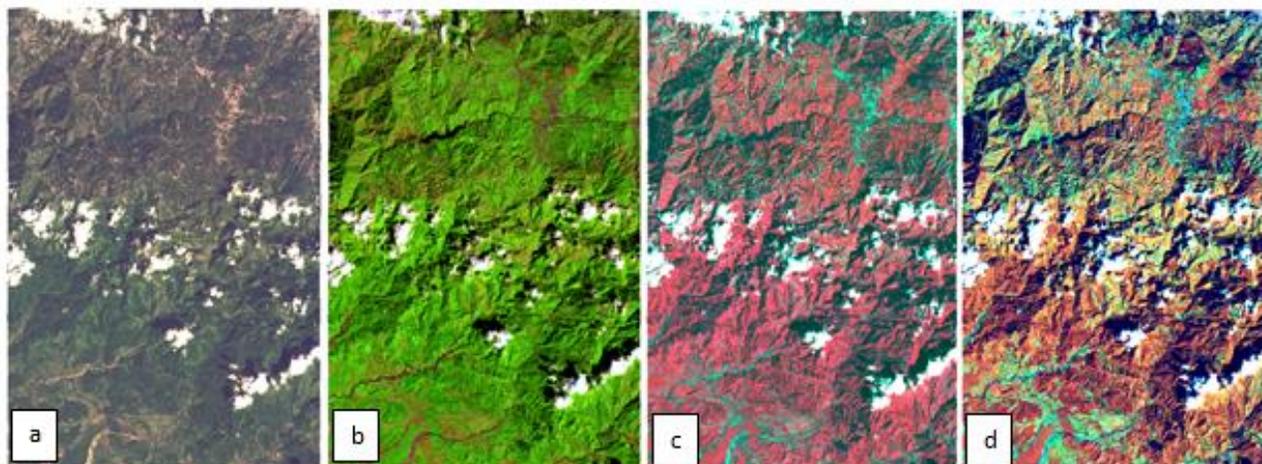


Figura 14. Combinación de bandas en la imagen recortada RT_LC80150532016024LGN00 del satélite Landsat 8 utilizada en el estudio.

5.2 Clasificación de la cobertura del cantón de Tarrazú

Según los resultados obtenidos en la clasificación realizada, la clase que abarcó más área fue el Bosque secundario, este cubrió 9415 ha, es decir un 31,5 % de la cobertura del cantón. Madrigal (2002), en un estudio realizado para el cantón mencionó la existencia de algunos bosques con intervención humana en diferentes etapas sucesionales, sin embargo, recalcó el problema de la corta de árboles para transformar terrenos en cafetales, situación que según personeros del MINAE (2016) a esta fecha se sigue generando. La clasificación colocó en segundo lugar al bosque maduro con un total de 7844 ha (26,3 %) de la cobertura de Tarrazú. El bosque secundario y el cultivo de café abarcaron el 50 % del territorio disponible dentro de los límites del cantón.

Sánchez (1996), colocó la cuenca del Río Pirrís como una de las cuencas con mayor dinámica de los cambios de cobertura, es aquí donde el sector norte del cantón de Tarrazú, ha aumentado la producción del cultivo de café, el cual, según Madrigal, (2002) era el cultivo perenne de uso principal en el área. Este cultivo presenta variaciones en su manejo, algunos productores lo combinan con sombra de plátano,

guineo y banano, variaciones consideradas en el trabajo de campo del presente análisis.

La clasificación permitió observar el proceso de sucesión que ha existido por parte de los pastos, los cuales abarcan 3699 ha, un 12,4 % del área, esta cobertura tiende a formar un gradiente con el bosque secundario, y este con el bosque maduro. La práctica de la ganadería según Madrigal, (2002), se vio reducida debido a su baja rentabilidad, y suplantada por productos de mayor costumbre en el cantón como lo es el cultivo de café. Sin embargo, algunos sectores de pastos no son aptos para el cultivo de café, por esto comienzan a generarse los procesos de sucesión secundaria constituyendo nuevos bosques.

La clase agua abarcó un total de 52,4 ha (0,4%) del territorio, esta clase incluyó el embalse del Proyecto Hidroeléctrico Pirrís, ubicado en el distrito de San Carlos. Según Castro, (2008), el proyecto posee un área inundada de 112 ha, las cuales son divididas por el límite entre el cantón de Tarrazú y León Cortés, generando una correspondencia entre la realidad y la clasificación realizada.

Después del proceso de reducción de nubes, se utilizó la clasificación de tres imágenes Landsat, lo que generó una reducción de la presencia de nubes a un valor de 4,1%, esto representó 1238 ha que no se pudieron interpretar. La presencia de nubes en la zona se debe a la convergencia de los vientos alisios y los vientos del sur, según el ICE, (1998), estos vientos ocasionan la producción de nubes con alta frecuencia en el tiempo.

Los valores referentes al porcentaje y cantidad de hectáreas correspondientes a las clases, se presentan en la figura 15.

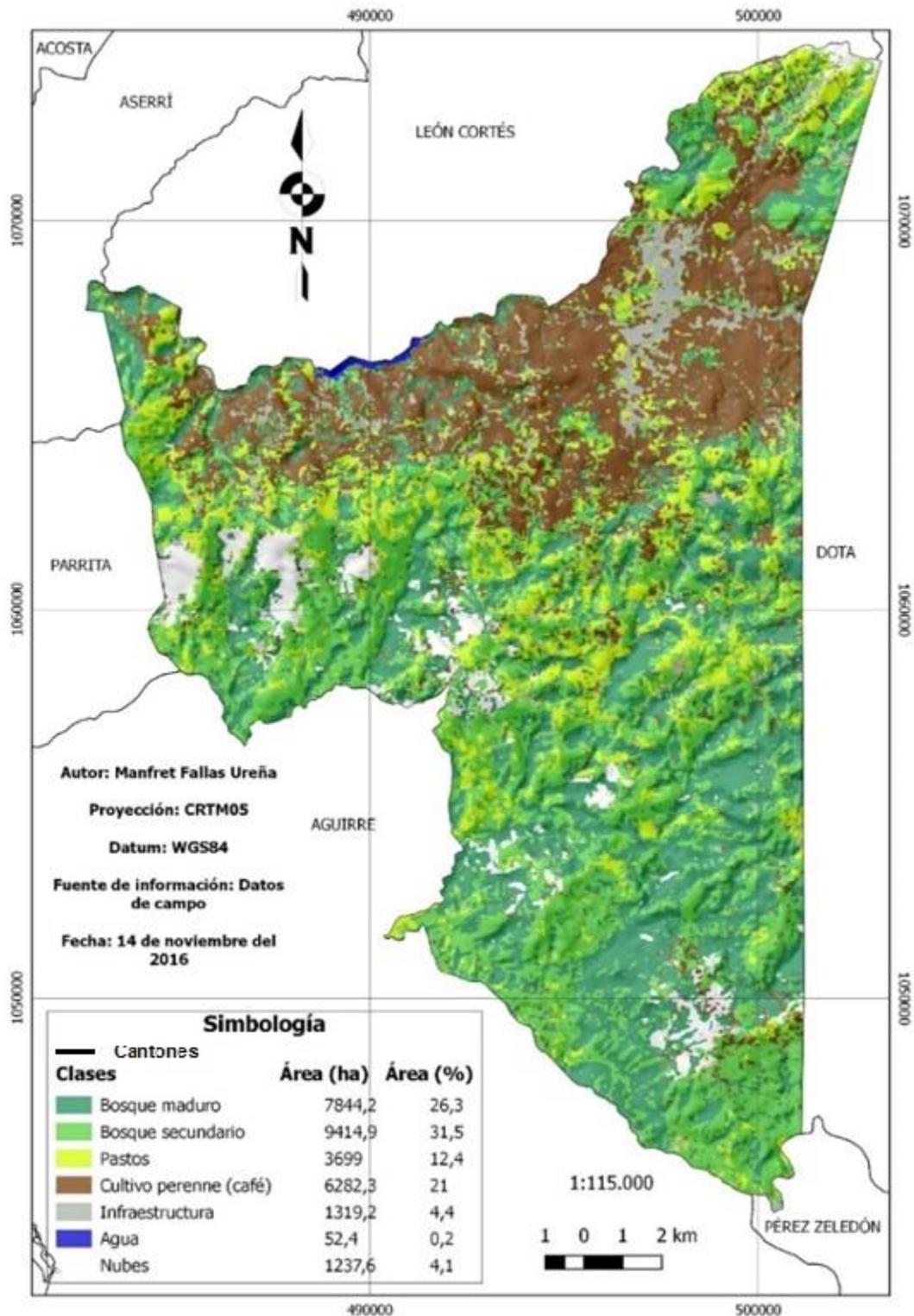


Figura 15. Clasificación de la cobertura del cantón de Tarrazú, San José, Costa Rica, 2016.

5.3 Cobertura por distrito

5.3.1 Cobertura de San Marcos

La clase del cultivo perenne (café) presentó el mayor porcentaje de cobertura (45,1%) para el distrito de San Marcos, esto cubre un total de 2116 ha. Por otro lado, se encontraron las clases de bosque secundario, bosque maduro, pastos e infraestructura, estas clases oscilan en un rango de 10 a 20 %.

Las zonas boscosas del distrito se encuentran en el sector norte, compuestas por el cerro La Trinidad (La Cruz) del distrito de San Pablo del cantón de León Cortés, además se encuentran los cerros de la comunidad de San Pedro que se extienden hasta el distrito el Jardín del cantón de Dota, como se observa en la figura 16.

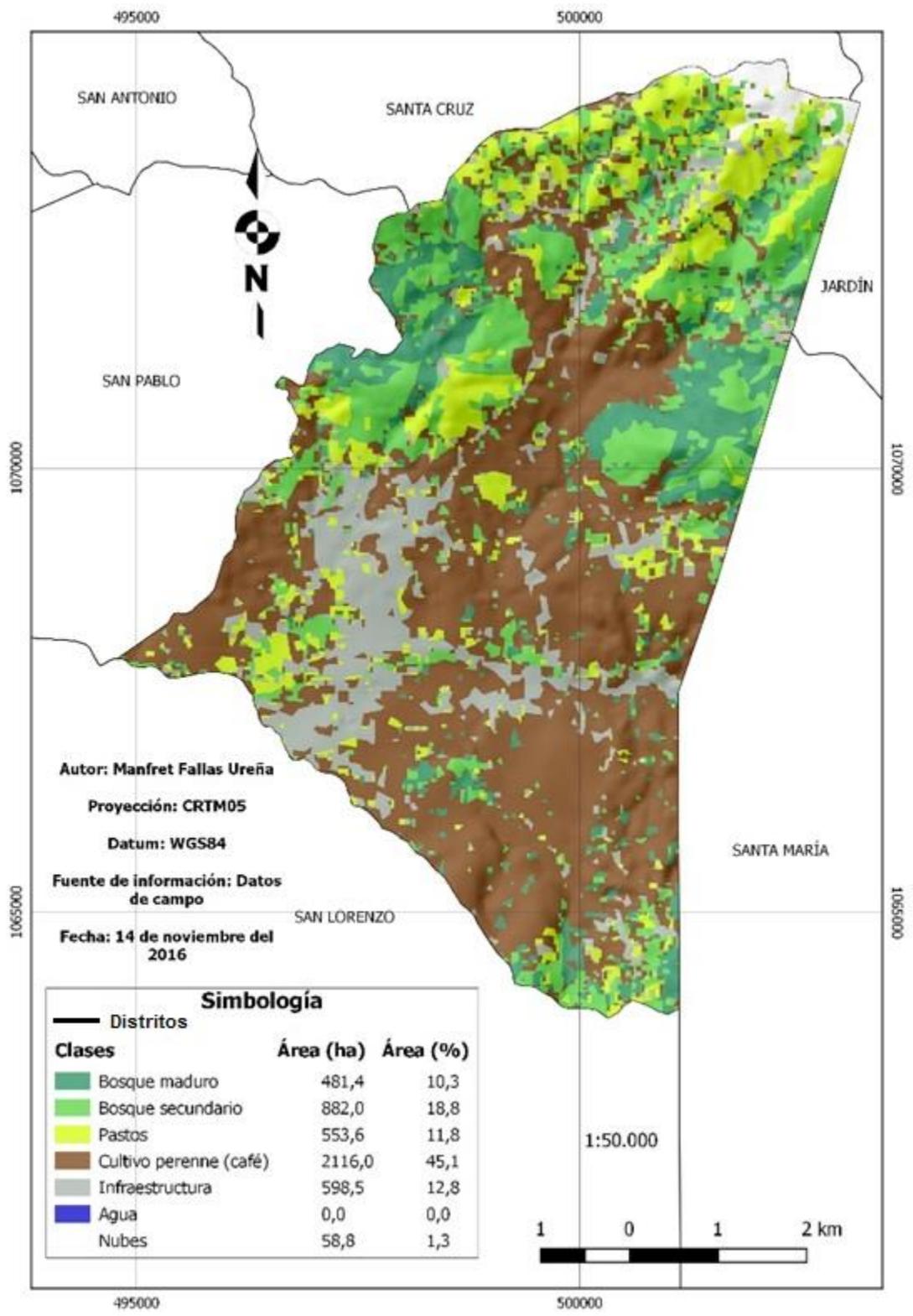


Figura 16. Clasificación de la cobertura del distrito de San Marcos, Tarrazú, San José, Costa Rica, 2016.

5.3.2 Cobertura de San Lorenzo

El distrito de San Lorenzo presentó dos clases que predominan, estas son el bosque secundario con 6465 ha y el bosque maduro con 6128 ha, estas coberturas corresponden a un 34,21% y 32,42 % del territorio disponible. La cobertura boscosa del distrito de San Lorenzo se encuentra en áreas de difícil acceso y con altas pendientes. Los pastos alcanzaron un 11,75%, los cuales se distribuyen a lo largo del distrito en forma conjunta con la cobertura boscosa.

Por otra parte, se obtuvo un comportamiento particular en el cultivo de café, el cual presentó el menor porcentaje de cobertura con un 15,42% de su territorio total, relacionado a los distritos de San Marcos y San Carlos en términos porcentuales, sin embargo, este porcentaje en hectáreas a nivel de distrito significó ubicarse en el primer puesto con 2914 ha, es por esto que San Lorenzo se puede considerar como el distrito con mayor cobertura de café en el cantón de Tarrazú

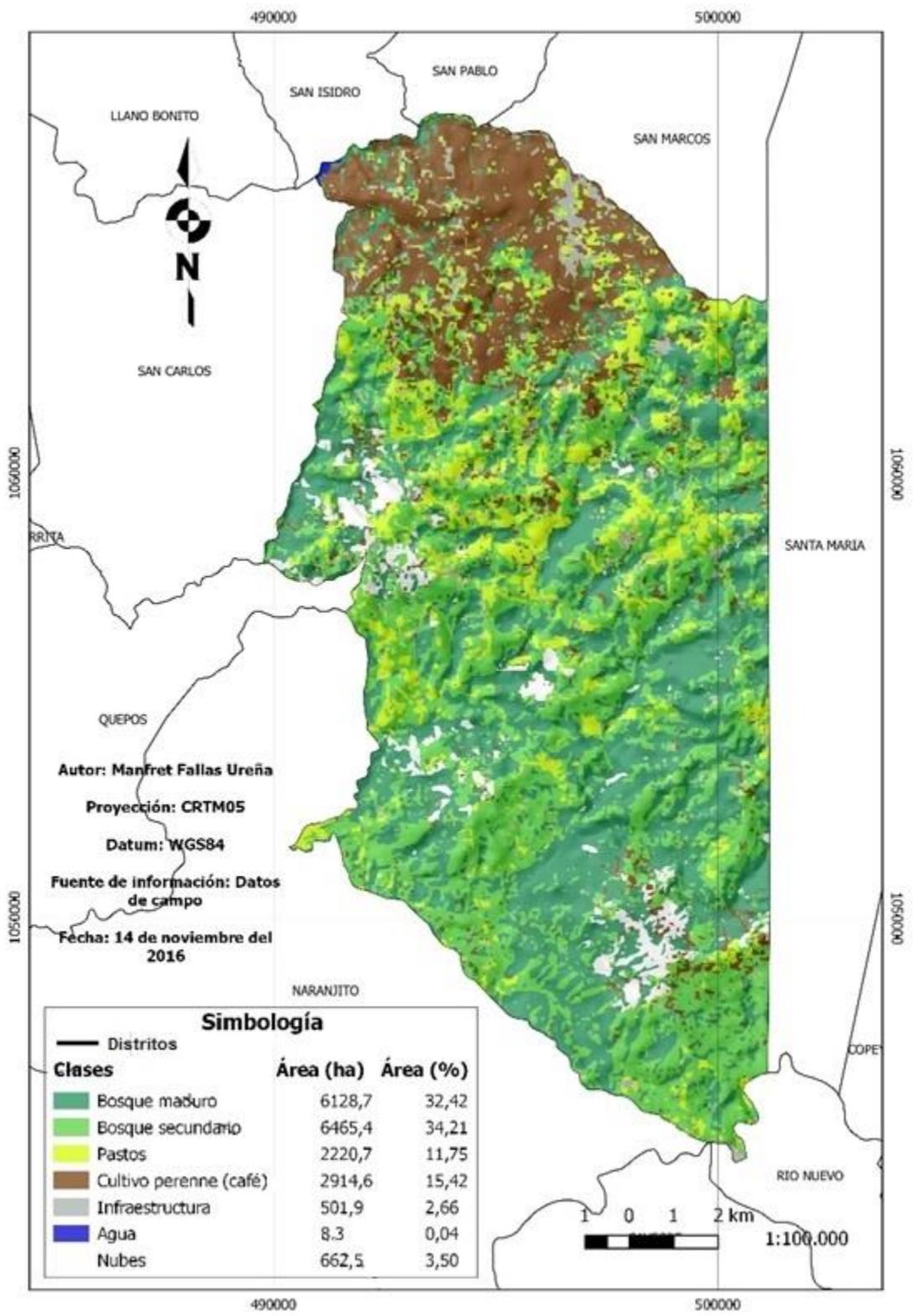


Figura 17. Clasificación de la cobertura del distrito de San Lorenzo, Tarrazú, San José, Costa Rica, 2016.



5.3.3 Cobertura de San Carlos

La figura 18 muestra los resultados del análisis de cobertura para el distrito de San Carlos. Se puede observar el bosque secundario, el cual resultó como la clase con mayor cobertura en el distrito de San Carlos con 2067,6 ha, esta clase representó el 33% del área. El área definida como bosque maduro alcanzó un 19,7 %, estas dos clases conformaron la zona boscosa del distrito en el sector sur. En el sector medio del distrito existe un lugar de transición conformado por pastos el cual en conjunto con otros pastos ubicados de manera aislada sumaron un 14,8 % del terreno disponible.

La cobertura del cultivo de café se desarrolla en el sector norte, acompañado de la infraestructura, siguiendo la cuenca del río Pirrís. Un 20 % del área (1251 hectáreas) fue clasificada en la clase de cultivo perenne (café).

En este distrito se encuentra aproximadamente el 95 % del sector del embalse del Proyecto Hidroeléctrico Pirrís que pertenece políticamente al cantón de Tarrazú, comprendido por 44,1 ha.

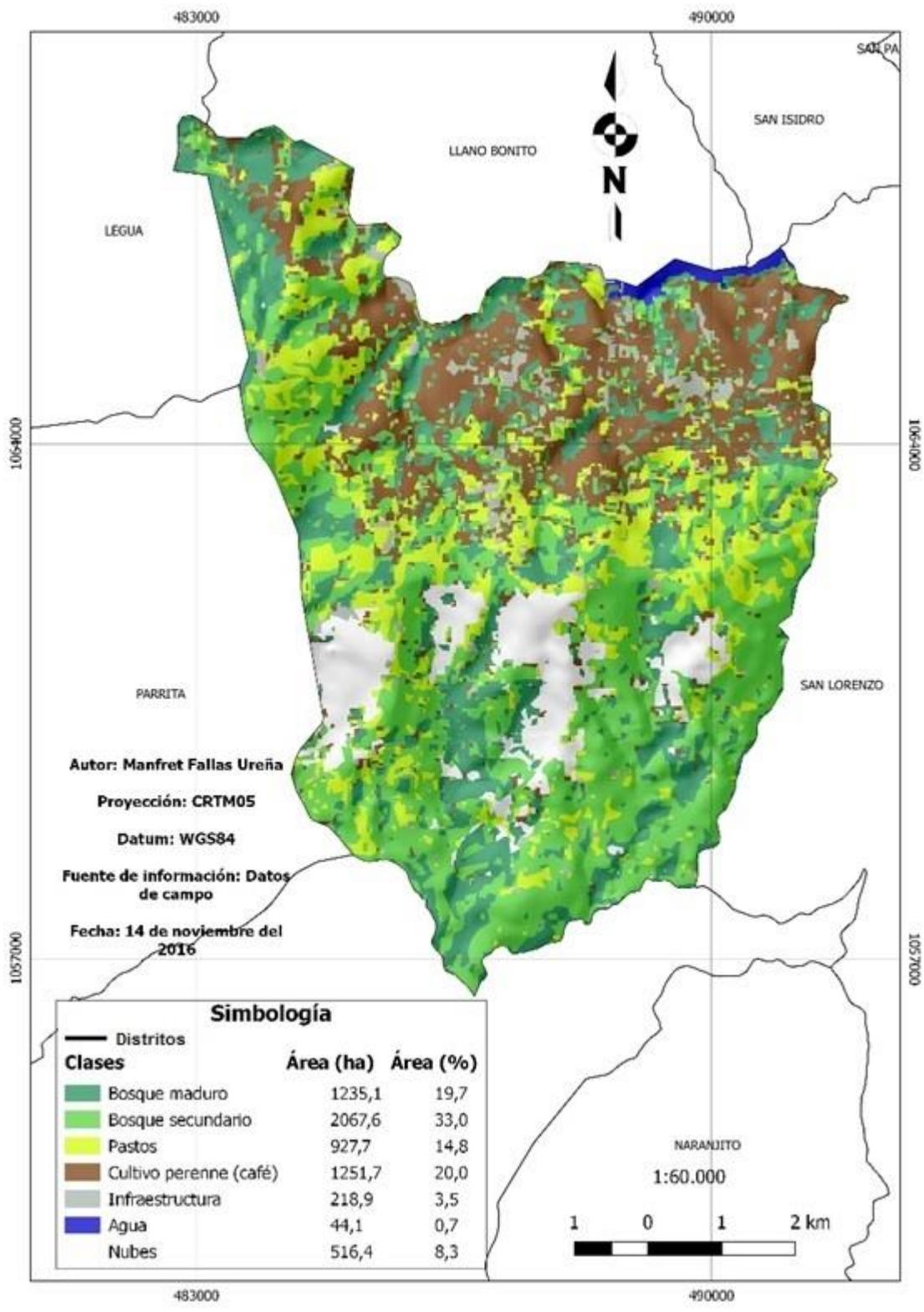


Figura 18. Clasificación de la cobertura del distrito de San Carlos, Tarrazú, San José, Costa Rica, 2016.



5.3.4 Comparación entre distritos

Cuadro 7. Área cubierta por las clases en hectáreas y su representación porcentual por distrito.

Distrito	San Marcos		San Lorenzo		San Carlos	
	ha	%	ha	%	ha	%
Clase de cobertura						
Área total distrito (ha)	4690,3	100	18902,1	100	6261,5	100
Bosque maduro	481,4	10,3	6128,7	32,4	1235,1	19,7
Bosque secundario	882,0	18,8	6465,4	34,2	2067,6	33,0
Pastos	553,6	11,8	2220,7	11,8	927,7	14,8
Cultivo perenne (café)	2116,0	45,1	2914,6	15,4	1251,7	20,0
Infraestructura	598,5	12,8	501,9	2,7	218,9	3,5
Agua	0,0	0,0	8,3	0,04	44,1	0,7
Nubes	58,8	1,3	662,5	3,5	516,4	8,3

En el cuadro 7 se muestra la comparación de hectáreas y porcentajes de territorio por distrito, y los valores por clase de cobertura.

El mayor porcentaje de la clase bosque maduro (6128,7 ha), se encontró en el distrito de San Lorenzo, distrito que además presentó el mayor número de hectáreas en la clase de bosque secundario, pues se encontró un total de 6465,4 hectáreas, estas dos clases representaron un 32,4 % y 34,2 % respectivamente.

San Lorenzo es el distrito con mayor área, y a su vez posee mayor cobertura boscosa, de esta manera el comportamiento del distrito de San Carlos es similar, sin embargo, este distrito tiene dedicado aproximadamente un 10% menos a la cobertura de bosque maduro. San Marcos por otra parte tiene destinado un 20% menos para la clase bosque maduro y un 6 % menos para la clase bosque secundario, en relación a la distribución porcentual del terreno del distrito de San Lorenzo. La distribución porcentual de la clase pastos es muy semejante en los tres distritos, pues se presentaron en un rango del 12% al 15 %.

El distrito de San Carlos presentó un 8,3 % (516,4 ha) de su territorio en la clase de nubes, este porcentaje fue el más alto. Sin embargo, el distrito de San Lorenzo presentó la mayor cantidad de área sin clasificar con un total de 662, 5 hectáreas.

San Marcos como cabecera de cantón, presentó el mayor porcentaje de área con infraestructura (12,8%) con respecto a los otros distritos. Además, es el distrito que presentó mayor porcentaje de cobertura de café (45,1%). Por cada hectárea de terreno en el distrito de San Marcos existe media hectárea de café, generando una fuerte competencia con otros tipos de coberturas.

Aunque San Marcos en términos porcentuales a nivel de distrito asigna más territorio al cultivo del café, es el distrito de San Lorenzo a nivel cantonal el que aporta un mayor número de hectáreas al cultivo perenne café, con un total aproximado de 2914 hectáreas.

Según Madrigal, (2002), el cantón de Tarrazú se incluye entre los cinco cantones que representan el 41,9 % del total del área sembrada de café a nivel nacional, por lo tanto San Lorenzo hace el mayor aporte a este resultado.

5.4 Validación de la clasificación

La clasificación se realizó con siete clases, de las cuales cinco se validaron mediante la matriz de confusión, y dos clases fueron validadas directamente, las cuales son nubes y agua.

La clase de nubes fue validada por fotointerpretación con las imágenes originales en la combinación de bandas falso color infrarrojo, esto permitió hacer un alto contraste entre las nubes y las diferentes coberturas (Figura 19), esta validación dio como resultado una exactitud del 100%.

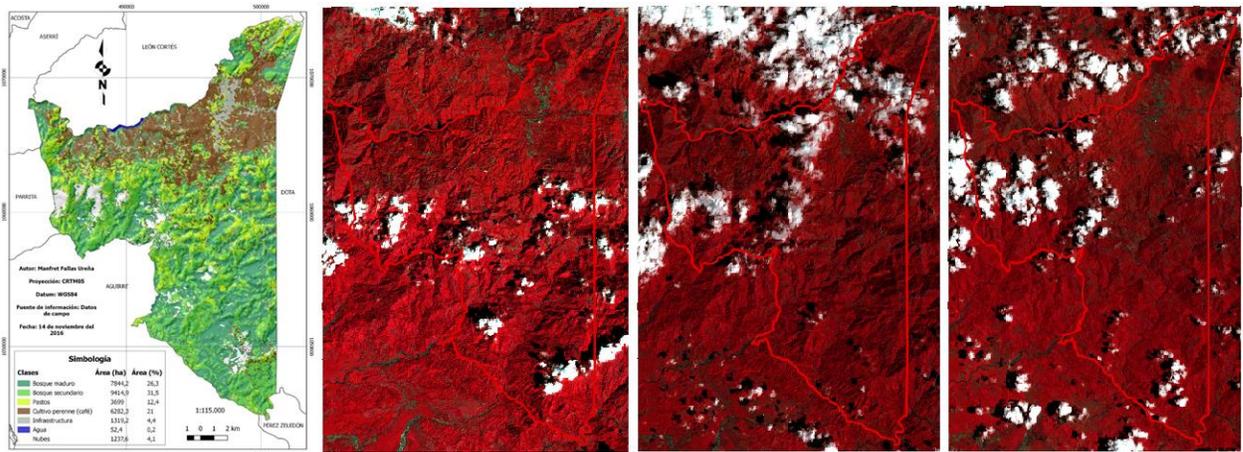


Figura 19. Comparación de la clase nubes (blanco), con las imágenes originales utilizadas en la clasificación dispuestas en falso color infrarrojo.

La clase de agua, representó de forma única, el embalse del Proyecto Hidroeléctrico Pirrís, así se demuestra en la figura 20, ubicado mayormente en el distrito de San Carlos, esta clase se validó haciendo la comparación con la imagen RT_LC80150532016024LGN00 recortada, utilizada en la clasificación. Esta validación resultó con un 100% de exactitud.

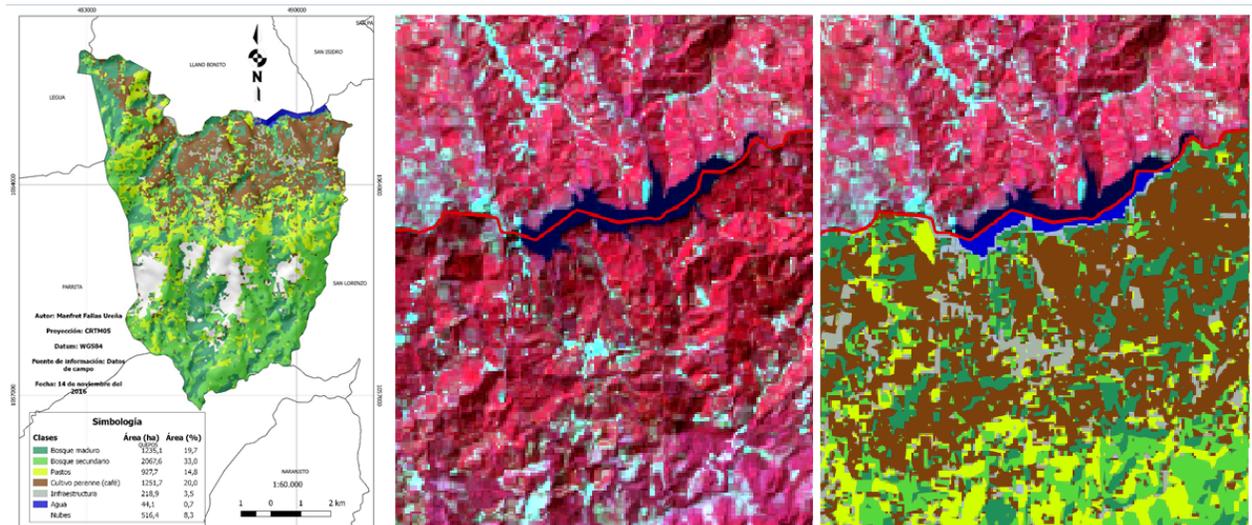


Figura 20. Comparación de la clase agua (azul) de la clasificación realizada con la imagen RT_LC80150532016024LGN00 recortada ubicada en el embalse del proyecto hidroeléctrico Pirrís.

5.4.1 Matriz de confusión

Cuadro 8. Matriz de confusión resultante de la clasificación del cantón de Tarrazú 2016.

CLASES	Bosque maduro	Bosque secundario	Pasto	Cultivo perenne (café)	Infraestructura	Total	Exactitud usuario (%)
Bosque maduro	25	2	0	1	0	28	89,29
Bosque secundario	1	40	3	3	0	47	85,11
Pasto	1	1	43	2	0	47	91,49
Cultivo perenne (café)	0	6	1	52	1	60	86,67
Infraestructura	0	0	6	3	45	54	83,33
Total	27	49	53	61	46	236	
Exactitud productor (%)	92,59	81,63	81,13	85,24	97,82		

Exactitud del productor

La mayor exactitud del productor por clase la obtuvo la infraestructura con una exactitud de 97,82%, según el análisis realizado, este valor tan cercano al 100 % se debió a la concentración de la infraestructura en puntos bien definidos, además el bosque maduro se ubicó con 92,59%, lo que reflejó una diferencia aceptable con el bosque secundario. El bosque secundario, los pastos y el cultivo perenne (café), presentaron una exactitud que varía entre el 81% y el 85%. La exactitud del productor de la cobertura de café estuvo influenciada por la similitud de los valores de reflectancia con las clases de bosque secundario en etapas tempranas, además se vio inmersa una confusión entre la infraestructura y áreas de cafetales recién

establecidas. Los pastos presentaron el menor valor de exactitud del productor, debido a la errónea clasificación de áreas de infraestructura en esta clase, además se incluyó la errónea clasificación de zonas boscosas de crecimiento secundario en etapas tempranas, en la clase de pastos.

Exactitud del usuario

La clase con mayor exactitud de usuario, fue la clase pastos con 91,49 %, en segundo lugar, se ubicó el bosque maduro con 89,29 %. Las clases bosque secundario, infraestructura y cultivo perenne (café), presentaron mayores errores en la clasificación, sin embargo, superaron el 80 % exactitud. Así por ejemplo, a) El bosque secundario presentó complicaciones en las etapas iniciales de formación, donde generó confusión con la clase de pastos y cultivos recién establecidos. b) La clase infraestructura registró áreas clasificadas de forma errónea como cultivo de café y en mayor grado como pastos. Finalmente, c) El cultivo de café con 86,67 % de exactitud, presentó un conflicto de clasificación con la clase bosque secundario, debido a los modelos de siembra establecidos en el cultivo, pues el café se desarrolla junto a especies arbóreas, estas especies generan el proceso conocido como cierre de copas, por lo tanto, el cultivo fue interpretado en algunas zonas como bosque secundario.

Exactitud general a partir de la matriz de error

Al analizar la exactitud de la clasificación de forma general, esta alcanzó un valor de 86,86 %, teniendo en cuenta las cinco clases analizadas por la matriz de error. En el Inventario Nacional Forestal 2013-2014 se obtuvo un valor para nueve clases de 92 % en la exactitud global y para tres clases un valor de 94 %. De esta forma, al tomar estos datos como referencia, los resultados de este estudio presentaron una exactitud menor. Esta diferencia en la exactitud se puede deber a la calidad de las imágenes utilizadas, pues el análisis de cobertura para el Inventario Nacional Forestal 2013-2014 fue realizado con imágenes Rapideye, las cuales tienen una

resolución espacial de 5m, a diferencia de los 30 metros de resolución que tienen las imágenes satelitales manejadas en este estudio.

5.4.2 Análisis de aleatoriedad de los datos

$$N^2 = 236 * 236 = 55696$$

$$\sum_{i=1}^5 x_{ii} = 25+40+43+52+45 = 205$$

$$\sum_{i=1}^5 (x_{i+} * x_{+i}) = (27*28) + (49*47) + (53*47) + (61*60) + (46*54) = 11694$$

$$K_{hat} = \frac{(236 * 205) - 11694}{55696 - 11694} = 0,8337 = 83,37\%$$

Un valor K_{hat} de 0,83 indicó que la clasificación es un 83% mejor que la separable por el simple azar.

5.5 Transferencia de información a funcionarios de la Municipalidad de Tarrazú.

Las ideas generadas por el grupo participante, fueron debatidas en el taller, para encontrar posibles usos de la información según las necesidades. El resultado de la clasificación permitirá a los funcionarios de la Municipalidad tener información complementaria para los siguientes temas:

- Para construir un plan regulador, pues la capa de cobertura del suelo es una de las capas base que se utilizan en este tipo de estudios.
- Hacer validaciones preliminares de la cobertura de terrenos.
- Definir zonas potenciales para el desarrollo vial, según la clase de cobertura presente y la población, ocupación y producción obtenidas de otras fuentes.
- Conocer con un buen grado de exactitud, el tipo de cobertura de las zonas con el fin de tener un panorama claro antes de hacer visitas de campo. Por ejemplo, saber si existe bosque para realizar las gestiones con el MINAE.
- Determinar de manera preliminar las coberturas existentes en sitios dónde se van a realizar estudios para la explotación de minas a cielo abierto (tajos).

6. Conclusiones

La clasificación de la cobertura y su correspondiente validación, fueron realizadas de forma satisfactoria con valores similares a los obtenidos en otros estudios realizados en el país.

Se generaron los mapas, en los cuales se representan gráficamente los resultados obtenidos para el cantón de Tarrazú y de forma individual para los distritos de San Marcos, San Lorenzo y San Carlos.

El taller logró transmitir la información adquirida sobre las coberturas del suelo y se generó una lista de temas para utilizar los resultados.

7. Recomendaciones

Utilizar la información obtenida en el análisis de cobertura de forma preliminar, si se desea especificar la cobertura de un sitio, se debe complementar con una visita al campo.

Utilizar los productos de este trabajo para diseñar políticas a nivel municipal que beneficien las coberturas boscosas existentes, tal como:

- a) Ubicar posibles zonas boscosas que están susceptibles a procesos de degradación por la acción humana.
- b) Detectar y cuantificar procesos de recuperación y crecimiento secundario en bosques.
- c) Preparar el plan regulador para el cantón.

Finalmente, se recomienda preparar otro mapa de cobertura del cantón para el año 2020, el cual permita observar los cambios provocados por las medidas establecidas por la municipalidad en las distintas clases de cobertura.

8. Bibliografía

Abraira, V. (2001). *El índice Kappa*. Unidad de Bioestadística. Madrid. Recuperado de ftp://ftp.hrc.es/pub/bioest/diag/kappa_semergen.pdf

Alcaldía Municipal de Miranda Cauca. (2001). *Esquema de ordenamiento territorial miranda cauca*. Material no publicado.

Ariza, A. (2013). *Descripción y corrección de productos landsat 8, LDCM (landsat data continuity mission)* (Instituto Geográfico Agustín Codazzi, Centro de Investigación y Desarrollo, Grupo Interno de Trabajo en Percepción Remota y Aplicaciones Geográficas. ed.). Bogotá, Colombia: Instituto Geográfico Agustín Codazzi. Recuperado de <http://www.un-spider.org/sites/default/files/LDCM-L8.R1.pdf>

Barrazza, V. K., Haydee. (2002). *Introducción a la teledetección cuantitativa. interacciones en el óptico: Firmas espectrales*. Material no publicado.

Burrough, P.A.; McDonnell, R.A.; 2000: *Principles of Geographical Information Systems* Oxford University Press, Oxford, 333 pp.

Butler, K. (2013). Band combinations for landsat 8. Recuperado de <https://blogs.esri.com/esri/arcgis/2013/07/24/band-combinations-for-landsat-8/>

Castillo, M., & Chavarría, M. I. (2013). *Reporte estadístico FORESTAL*. (Estadístico). Costa Rica: Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ).

Castro Roig, J. (2008). Especificación técnicas de Pirrís. *Construcción Del Proyecto Hidroeléctrico Pirrís*, (232). Recuperado de <http://www.cfia.or.cr/descargas/revistas%202008/232.pdf>

Congedo, L. (2015). *Semi-Automatic Classification Plugin Documentation*.



ESRI. (2016). ArcGIS, resources: Introducción a ArcGIS. Recuperado de <http://resources.arcgis.com/es/help/getting-started/articles/026n00000014000000.htm>

FAO. (2002). *Los arboles fuera del bosque*. Recuperado de <http://www.fao.org/docrep/005/y2328s/y2328s00.htm#toc>

FAO. (2010). In Chavarría Espinoza M. I., Noches Fernández L.(Eds.), *Evaluación de los recursos forestales mundiales* [Evaluación de los recursos forestales mundiales, Informe Nacional, Costa Rica]. Roma: Recuperado de <http://www.fao.org/docrep/013/al483S/al483S.pdf>

Fernández Coppel, I., & Herrero Llorente Eliecer. (2005). El satélite Landsat. Análisis visual de imágenes obtenidas del sensor ETM+ satélite Landsat., 14 de noviembre del 2016.

Frenzel, L. (2003). *Sistemas electrónicos de comunicaciones* (Tercera reimpresión edición). México, D. F.: Alfaomega. pp. 21 a 23

GeoCVC. (2010). *Guía explícita de la temática de cobertura y uso del suelo*. Valle del Cauco, Colombia: Recuperado de <http://geocvc.co/pdf/GuiaCoberturaUso.pdf>.

Instituto Costarricense de Electricidad (ICE). (1998). Estudio ambiental para la cuenca de Río Pirrís, San José, Costa Rica.

INEC. (2012). *X censo nacional de población y VI de vivienda 2011 resultados generales*. (). San José: Gerencia de Logística y Recursos Institucionales.

ITCR, (2014). Instituto Tecnológico de Costa Rica. Escuela de Ingeniería Forestal. DVD

Kruse, F. A., Lefkoff, A. B., Boardman, J. W., Heidebrecht, K. B., Shapiro, A. T., Barloon, P. J., & Goetz, A. F. H. (1993). *The spectral image processing system (SIPS)—interactive visualization and analysis of imaging spectrometer data*. *Remote sensing of environment*, 44(2), 145-163.

Laguna, D. (2012). *Propuesta de clasificación de cobertura vegetal y uso del suelo 2012*.



Lillesand, T., Kiefer Ralph, & Chipman, J. (Eds.). (2015). *Remote sensing and image interpretation*, (7 ed.) Wiley.

Madrigal Mora, J. (2002). *Diagnóstico de amenazas naturales, herramientas necesarias para los planes de ordenamiento territorial e implementación de medidas de prevención y mitigación para la protección del ambiente en la cuenca hidrográfica superior del río Pirrís, san José, Costa Rica*. Recuperado de <https://www.cne.go.cr/CEDO-CRID/CEDO-CRID%20V4/pdf/spa/doc2982/doc2982-1.pdf>

Méndez, J. (2011, Julio, 2011). Quantum gis (QGIS): Un sistema de información geográfica basado en software libre. Recuperado de <http://gkudos.com/blog/2011/02/15/quantum-gis-QGIS-un-sistema-de-informacion-geografica-basado-en-software-libre/>

MINAE. (2016). *Áreas de protección: Legalidad*. Charla.

Oliveira de Aquino, C. E., & Sabóia, C. M. (2015). *Crecimiento urbano e impactos sobre a cobertura vegetal no bairro vale do gavião-Teresina-PI-BR*. *Revista Da Casa Da Geografia De Sobral (RCGS)*, 17(2), 68-84. Recuperado de <http://uvanet.br/rcgs/index.php/RCGS/article/view/176>

Pérez, D. (2007). *Introducción a los Sensores Remotos. Aplicaciones Curso Teórico Práctico*. Buenos Aires, Argentina: Laboratorio de Tectónica Andina. Consultado el 21 de junio de 2015, Recuperado de http://www.geologica.org.ar/archivos_usuarios/2010/09/Curso_UNT_Programa_DJ_P_2010_b.pdf

Pérez, C., & Muñoz, Á. (2006). Introducción a la teledetección espacial. In C. Pérez Gutiérrez (Ed.), *Teledetección: Nociones y aplicaciones* (pp. 1-16)

QGIS, D. T. (2015). *Quantum GIS geographic information system*. Version 2.14.7. *Open Source Geospatial Foundation Project*.

Sánchez, G.A. 1996. *Assessing Land Use/Cover Change in Costa Rica*. Doctoral dissertation. University of New Hampshire.



Sarría, F. (2008). *Técnicas de teledetección aplicadas a la gestión de los recursos hídricos*. Murcia, España: Universidad de Murcia. Recuperado de <http://ocw.um.es/ciencias/herramientas-de-teledeteccion-aplicadas-a-la/material-de-clase-1>

Sistema Nacional de Áreas de Conservación (SINAC) – Programa REDD-CCAD-GIZ. (2015). Cartografía base para el Inventario Forestal Nacional de Costa Rica 2013-2014. Preparado por Ortiz, E. et al. como consultor para el Inventario Forestal Nacional de Costa Rica, dentro del marco del Programa REDD/CCAD/GIZ. San José, Costa Rica. 52 p.

SINAC, SIREFOR, MINAE. (2013). *Reporte estadístico forestal 2013/SINAC, SIREFOR, MINAE*. San José: GIZ.

SIREFOR. (2010). Sistema de información de los recursos forestales de costa rica, definiciones forestales. Recuperado de http://www.sirefor.go.cr/?page_id=778

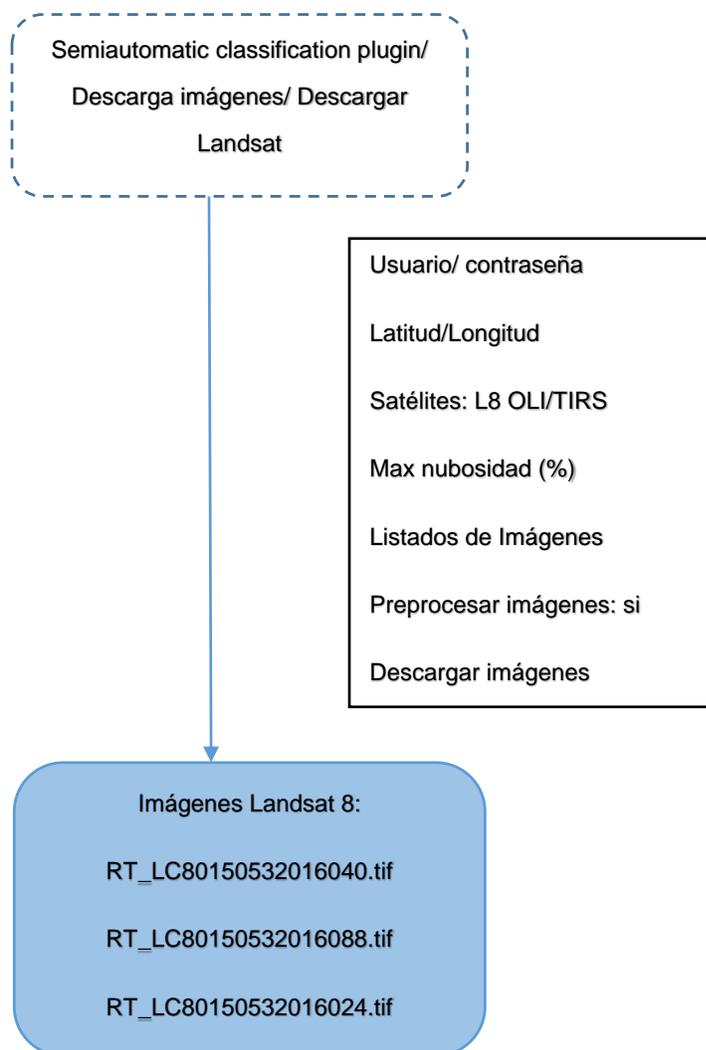
Teledet. (2014). Imágenes satelitales. clasificación supervisada. Recuperado de <http://www.teledet.com.uy/tutorial-imagenes-satelitales/clasificacion-supervisada.htm>

Vivancos, Jordi. Grau, Mónica. Llastarri, Albert. Vivancos, Daniel. (2005). *La tierra a vista de satélite: Introducción a la teledetección*. ECI

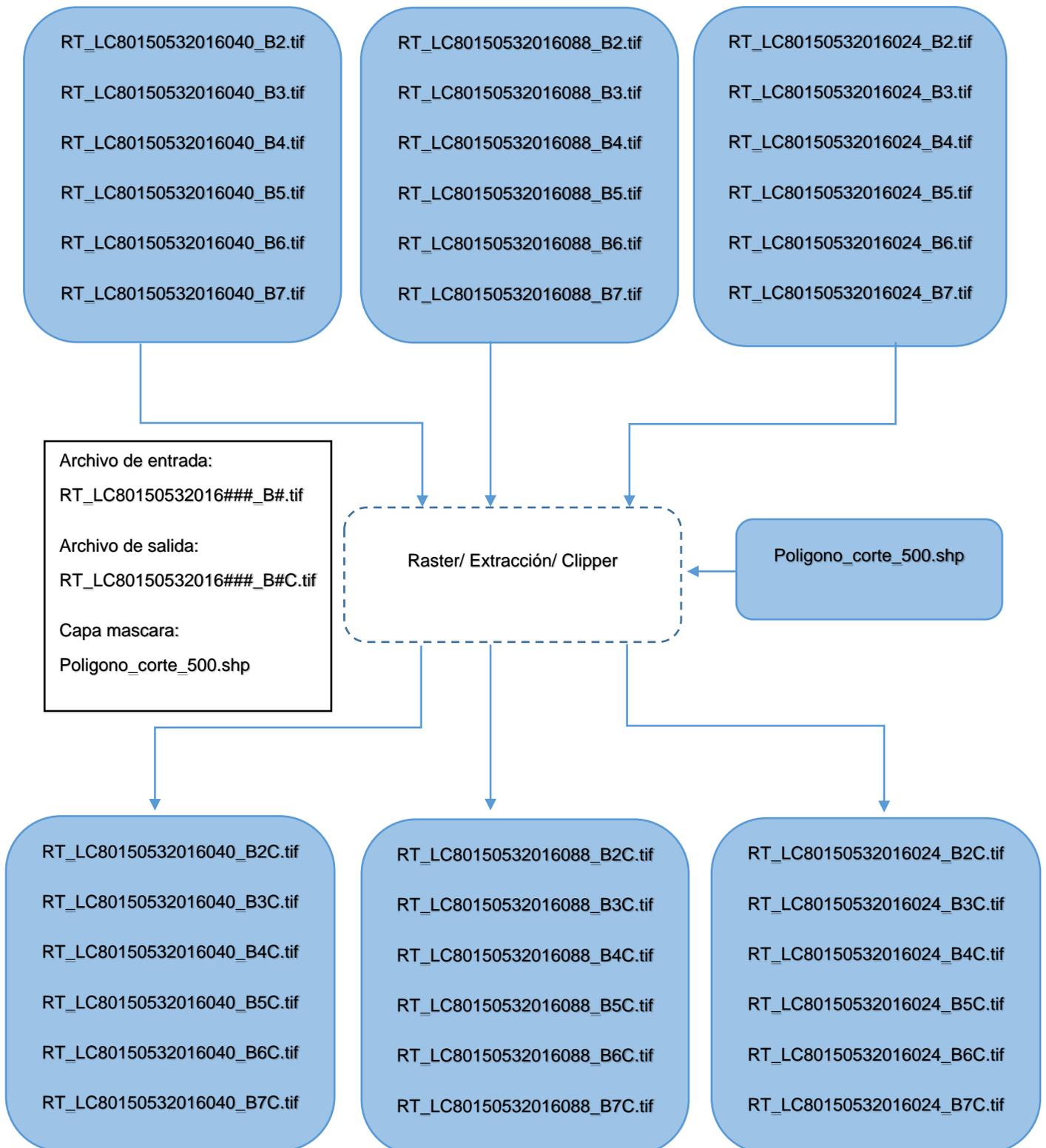
Wynne, R; Oderwald, R; Reams, G; Scrivan, J. (2000) *Optical remote sensing for forest area estimation*, Journal of Forestry (98) (2000), pp. 31–36

9. Anexos

Anexo 1. Modelo cartográfico de la descarga y transformación de las imágenes satelitales a la reflectancia de la superficie.



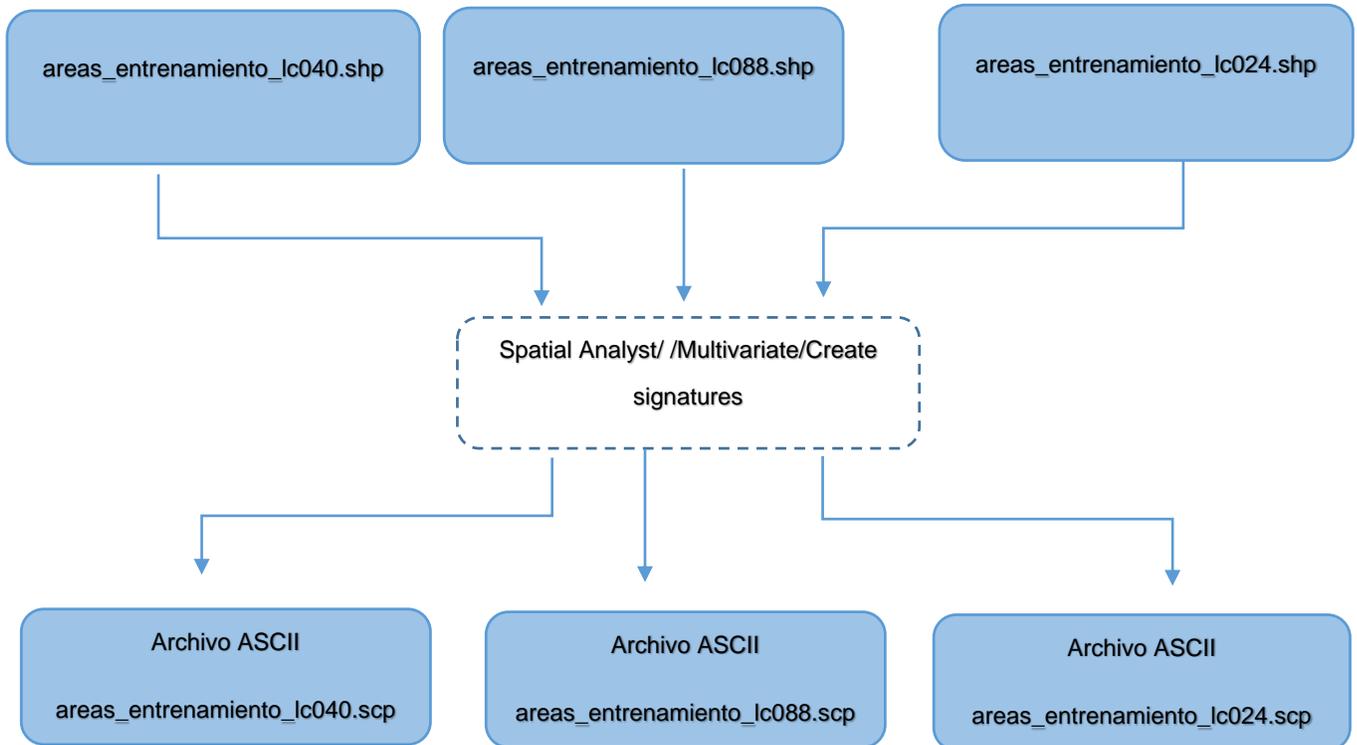
Anexo 2. Modelo cartográfico del corte de las 3 imágenes multibanda.



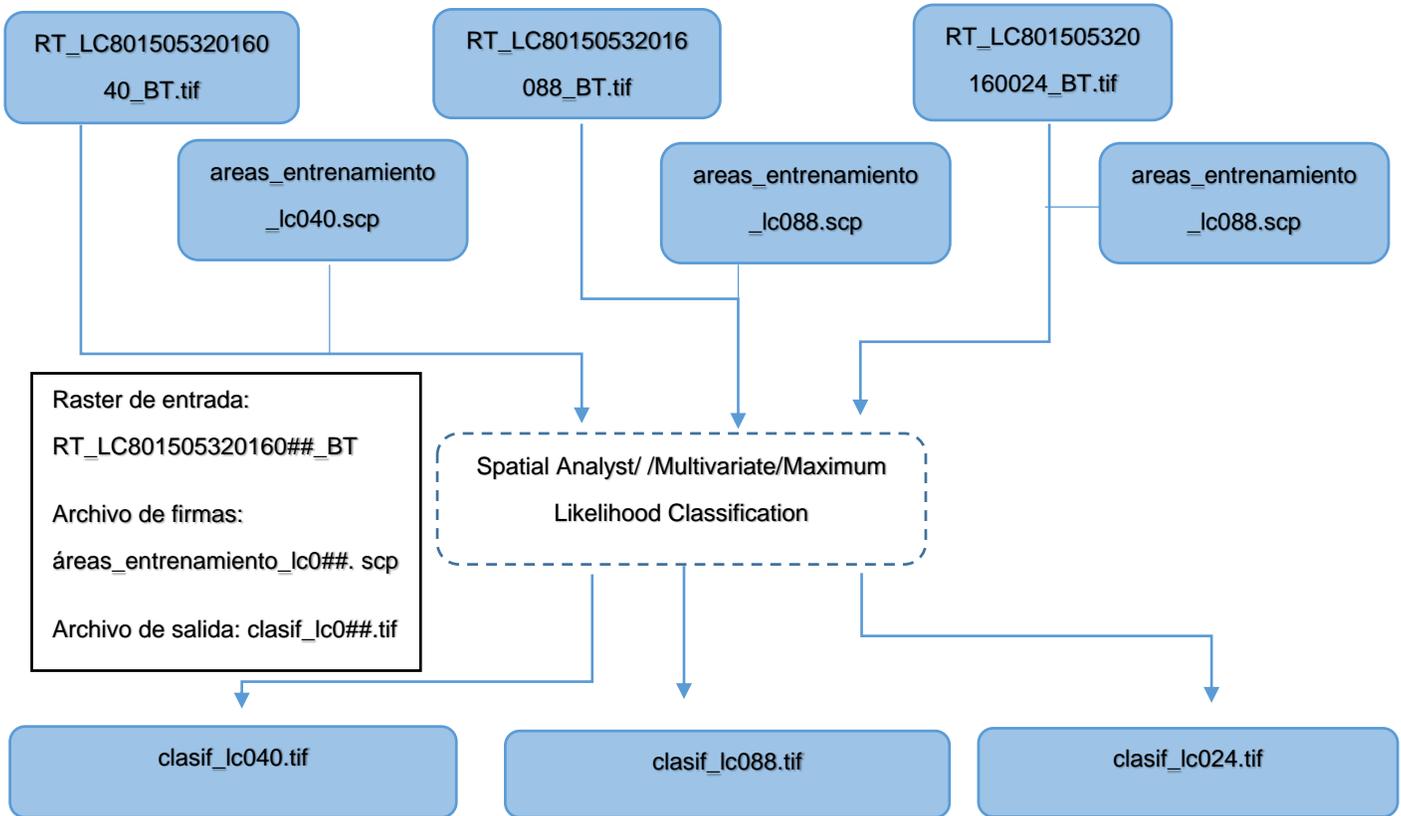
Anexo 3. Modelo cartográfico de la unión de bandas 2,3,4,5,6 y 7 en las 3 imágenes satelitales Landsat 8.



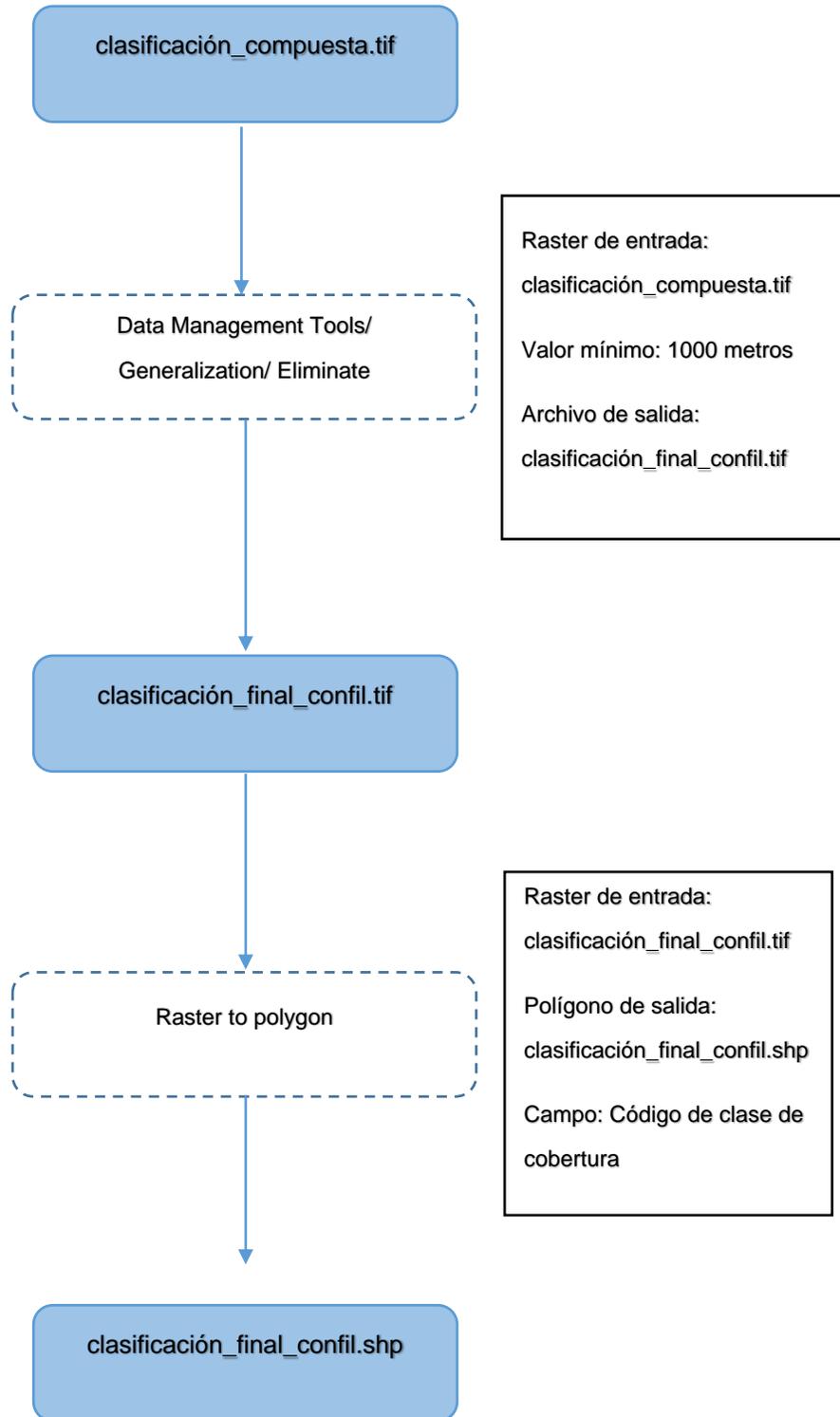
Anexo 4. Modelo cartográfico de la creación de firmas a partir de las áreas de entrenamiento.



Anexo 5. Modelo cartográfico del proceso de clasificación de cobertura



Anexo 6. Modelo cartográfico de la aplicación del filtro a clasificación final y transformación a formato vectorial.



Anexo 7. Lista de participantes del Taller: Cobertura del suelo para el año 2016, del cantón de Tarrazú, San José, Costa Rica, realizado el martes 10 de enero del 2017.

Lista de asistencia
Taller
Cobertura del suelo para del año 2016, del cantón de Tarrazú, San José, Costa Rica.
Fecha: 10/01/2017
Lugar: Salón de sesiones de la Municipalidad de Tarrazú

Nombre Completo	Firma	Departamento	Correo electrónico
José Casco Vaciño	<i>[Firma]</i>	Ecología	josca.casco@munitorrazu.cr
José Fabro Zaniga Carballo	<i>[Firma]</i>	UTGV	asistente_tecno_ut@munitorrazu.cr
LIDY GAMBOA CHACON	<i>[Firma]</i>	D.C.U	c.urbanos@munitorrazu.cr
Eddy Quesada	<i>[Firma]</i>	Campo	
Yanier Mora Mora	<i>[Firma]</i>	UTGV	ingenieros@munitorrazu.cr