

**DETECCIÓN DIRECTA DE CAMBIOS DE LAS COBERTURAS BOSCOSAS EN
LA CUENCA BAJA DEL RIO CRAVO SUR, PERIODOS 1990 – 2000 – 2016.**



**UNIVERSIDAD DE
MANIZALES**

**UNIVERSIDAD DE MANIZALES
FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA
PROGRAMA ESPECIALIZACIÓN EN SISTEMAS DE INFORMACIÓN
GEOGRÁFICA
MANIZALES
2016**

**DETECCIÓN DIRECTA DE CAMBIOS DE LAS COBERTURAS BOSCOSAS EN
LA CUENCA BAJA DEL RIO CRAVO SUR, PERIODOS 1990 – 2000 – 2016.**

Trabajo de Grado presentado como opción parcial para optar
al título de Especialista en Información Geográfica

**UNIVERSIDAD DE MANIZALES
FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA
PROGRAMA ESPECIALIZACIÓN EN SISTEMAS DE INFORMACIÓN
GEOGRÁFICA
MANIZALES
2016**

AGRADECIMIENTOS

Expresamos nuestros agradecimientos a:

Dios, por regalarnos esa sabiduría, perseverancia y persistencia para llevar a cabo todos los proyectos y metas trazadas en cada una de nuestras vidas.

Nuestras familias que siempre han sido parte incondicional en nuestra formación académica y personal.

Corporinoquia, entidad que nos ha acogido en los últimos años y han sido parte fundamental para la ejecución de este trabajo de grado.

Nuestros compañeros de trabajo, estudio y amigos que de alguna u otra manera han contribuido con la realización de este proyecto de tesis.

Y a todas esas personas que participaron directa o indirectamente para la realización de este proyecto grado, aportando su tiempo y conocimiento para lograrlo

A todos y a cada uno de ustedes infinitos agradecimientos.

CONTENIDO

RESUMEN	10
INTRODUCCIÓN	12
1. ÁREA PROBLEMÁTICA	14
2. OBJETIVOS	16
3. JUSTIFICACIÓN	17
4. MARCO TEÓRICO	18
4.1. LOS SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA (SIG).....	18
4.2. COBERTURAS Y USOS DE LA TIERRA	19
4.2.1. Clasificación de las Coberturas.	20
4.2.2. Los Bosques y sus Características	21
4.3. INSIDENCIAS EN LAS COBERTURAS BOSCOSAS	22
4.3.1. Deforestación.....	22
4.3.2. Regeneración	23
4.3.3. Fragmentación.....	23
4.3.4. Cálculo de la Deforestación	23
4.4. DETECCIÓN DE CAMBIOS.....	24
4.4.1. Análisis de Componentes Principales	25
4.5. PLATAFORMA DE TELEDETECCIÓN LANDSAT.....	25
4.5.1. Características de Landsat 5.	26
4.5.2. Características de Landsat 7.	26
4.5.3. Características de Landsat 8.	27
4.5.4. Identificación de los bosques	28
4.5.5. Tratamientos y procesamiento de las Imágenes Landsat.....	28
5. METODOLOGÍA.....	30
5.1. FASE I. Área de estudio.....	31
5.2. FASE II. Delimitación de la cuenca baja.	31
5.3. FASE III. Búsqueda de Imágenes.	32
5.4. FASE IV. Pre-procesamiento de las imágenes.	32
5.5. Fase V. Procesamiento digital de las imágenes.	37
5.6. FASE VI. Evaluación de la Exactitud temática.....	38

6. RESULTADOS	39
7. DISCUSION	43
8. CONCLUSIONES	45
9. BIBLIOGRAFÍA.....	46
ANEXOS.....	49

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Ancho de banda para los sensores OLI y TIRS en Landsat 8 y ETM+ en Landsat 7	28
Figura 2. Modelo metodológico del trabajo	31
Figura 3. Valores de la radiancia atmosférica	35

LISA DE TABLAS

Tabla 1. Características de las imágenes Landsat 5.....	26
Tabla 2. Características de las imágenes Landsat 7.....	27
Tabla 3. Distribución de las bandas en OLI y TIRS en imágenes Landsat 8.	27
Tabla 4. Información de las imágenes landsat.	32
Tabla 5. Parámetros para la conversión a reflectividades de imágenes landsat....	33
Tabla 6. Balance General de coberturas de la Cuenca Baja del Río Cravo Sur, Periodos 1900 - 2000 - 2015.....	40
Tabla 7. Tasas de deforestación para Colombia.....	40
Tabla 8. Resultados de Tasa de Deforestación para el Casanare según el IDEAM, 2012	43

LISA DE IMÁGENES

Imagen 1. Localización de la Parte Baja de la Cuenca del Río Cravo Sur.	15
Imagen 2. Cambios en la Cobertura Boscosa de la parte Baja de la Cuenca del Río Cravo Sur, Periodo 1990 - 2000.	41
Imagen 3. Cambios en la Cobertura Boscosa de la parte Baja de la Cuenca del Río Cravo Sur, Periodo 2000 - 2016.	42

LISTA DE ANEXOS

Anexo A. Cobertura de Bosque en la Parte Baja de la Cuenca del Río Cravo Sur, Año 1990.	49
Anexo B. Cobertura de Bosque en la Parte Baja de la Cuenca del Río Cravo Sur, Año 2000.	50
Anexo C. Cobertura de Bosque en la Parte Baja de la Cuenca del Río Cravo Sur, Año 2015.	51
Anexo D. Comparación de Resultados de Cambios Coberturas para la Cuenca del Río Cravo Sur.	53

RESUMEN

En el presente trabajo se implementó la detección directa de cambios a partir del método Análisis de Componentes Principales, y posterior comparación post-clasificación de las coberturas para conocer las transformaciones espaciales de los bosques en la cuenca baja del río Cravo Sur, jurisdicción de Corporinoquia.

Para la clasificación de las coberturas, se utilizaron imágenes Landsat 5, 7 y 8 de acceso libre correspondientes a los periodos de 1990, 2000 y 2016 respectivamente, transformado la información de los niveles digitales (ND) a valores biofísicos para la aplicación del método y posterior comparación post-clasificación de las unidades boscosas, a partir de lo cual se obtuvo los resultados de deforestación.

Se determinó que en la parte baja de la cuenca se han presentado diferentes focos de deforestación con dinámicas de pérdidas del 39,62% (12507,96 Ha.) entre 1990 - 2000 y del 39,12% (12832,37 Ha) entre el 2000 - 2016. Sin embargo también han habido aumentos considerables de las coberturas boscosas, en 1990 ha pasado de tener 31565,72 Ha a 32802,03 Ha en el 2000 y 34034,11 Ha en 2016, lo que representa un aumento gradual del 7,82% desde 1990, es decir, un aumento de 0,31% Anual (98,73 hectáreas/año).

Contrastando los resultados están muy cercanos a los determinado por Hansen *et al.*, (2013) quien determinó para el área de estudio una deforestación anual de 605,47 hectáreas para un total de 7265,61 Ha. durante entre el 2000 y 2012. También se puede decir que los procesos de deforestación están directamente relacionados con las áreas próximas a los cuerpos de agua, lo que explica la alta participación de la parte baja de la cuenca del río Cravo Sur con relación a la deforestación anual en todo el departamento, según Cabrera et al, IDEAM (2011) en esta zona se determina el 23% de la deforestación total del departamento del Casanare que se corrobora con los resultados del presente trabajo.

Palabras clave: deforestación, sistemas de información de cambios, análisis de componentes principales, cuenca baja.

ABSTRACT

In this paper the direct detection of changes implemented from the analysis method Principal Component and post-classification subsequent comparison of coverages to meet the spatial transformations of forests in the lower basin of the river Cravo Sur, jurisdiction Corporinoquia.

For the classification of hedges, Landsat 5, 7 and 8 free access for the periods 1990, 2000 and 2016 were used respectively transformed information digital levels (ND) to biophysical values for the application of the method and subsequent comparison post-classification of forest units, from which the results of deforestation was obtained.

It was determined that in the lower part of the basin have presented different foci of deforestation dynamics losses of 39.62% between 1990 (12,507.96 Ha.) - 2000 and 39.12% (12,832.37 hectares) between 2000 - 2016. However have also been significant increases in forest cover in 1990 has grown from 31,565.72 to 32,802.03 Ha Ha in 2000 and 34,034.11 hectares in 2016, representing a gradual increase 7.82% since 1990, ie an increase of 0.31% per annum (98.73 ha / year).

Comparing the results are very close to those determined by Hansen et al., (2013) who determined the study area for an annual deforestation rate of 605.47 hectares for a total of 7,265.61 ha Between 2000 and 2012. It is you can say that deforestation processes are directly related to the proximity to water bodies areas, which explains the high share of the lower part of the river basin Cravo Sur regarding annual deforestation throughout the department, according to Cabrera et al, IDEAM (2011) in this area 23% of the total deforestation of the department of Casanare which is corroborated by the results of the present work is determined.

Keywords: deforestation, information systems changes, principal component analysis, lower basin.

INTRODUCCIÓN

En Colombia existe gran interés en observar los comportamientos de las coberturas de la tierra, en particular las coberturas boscosas. Diferentes estudios se han realizado en torno a la detección de cambios por deforestación, análisis de causas y consecuencias, incluso determinación de las implicaciones y escenarios a la que ritmos acelerados de deforestación conllevarían, estudios de modelos para predecir las afectaciones y en general, analizar los acontecimientos debido a las consecuencias de emisiones de CO₂ a la atmosfera y su participación en el cambio climático debido a la pérdida de los bosques.

El objetivo del presente trabajo es realizar la detección directa de los cambios de coberturas boscosas en la parte baja de la Cuenca del Río Cravo Sur debido al fenómeno de deforestación, ya que de acuerdo a los estudios del Centro de Investigación y Desarrollo en Información Geográfica (CIAF), y el Plan de Ordenación y Manejo de la Cuenca del Río Cravo Sur se ha estimado que solo el 14% del área de la cuenca corresponde a coberturas boscosas, la mayor parte de la cuenca la ocupan los pastos (36,7% entre pastos bien drenados y pastos encharcados de la sabana), seguido de los matorrales ralos y bajos (23,7%) y los cultivos (16,4%).¹

Para el estudio se consideró como referencia el mayor tiempo posible de análisis, con base en la disponibilidad y calidad de las imágenes satelitales Landsat, para lo que se determinó los periodos comprendidos entre 1990, 2000 y 2016.

Con esta investigación se pretende proponer a la Corporación Autónoma Regional de la Orinoquía, herramientas para la priorización de las zonas que están dentro de su jurisdicción y que requieren medidas de protección y posibles trabajos de restauración de los focos o núcleos permanentes de deforestación, dado a que en la parte baja de la cuenca, presenta la menor proporción de los bosques de la zona, aumentando así las probabilidades de pérdida y degradación de los suelos por erosión, procesos de fragmentación, fragilidad del paisaje, pérdida de hábitat entre otros.

Es relevante considerar que en la cuenca baja del Río Cravo Sur se han identificado nueve especies forestales en peligro de extinción, lo que referencia la necesidad de la protección y aumento de las coberturas boscosas en la zona.

Los estudios de deforestación de la cuenca se han realizado haciendo énfasis en la parte alta y media debido a la importancia de la protección del nacimiento del

¹ Basado en cifras del "Plan De Ordenación y Manejo de la Cuenca Del Río Cravo Sur".

río, restándole significancia la parte baja. Estudios del IGAC² para el periodo 1992 – 2002 no arrojan grandes datos de deforestación, sin embargo datan que si ha habido una degradación de los bosques y en algunos casos han demostrado datos recuperación de los bosques sobre todo en las zonas protegidas.

Teniendo en cuenta los anterior, aplicando técnicas de procesamiento directo de imágenes satelitales y el uso de los Sistemas de Información Geográfica, se pretende determinar a escala 1:100.000, lo que ha acontecido con los bosques en la Cuenca Baja del Río Cravo Sur, por lo tanto se ha considerado la importancia de determinar la pérdida anual y recurrente de los bosques, y evidenciar las zonas con mayor incidencia de deforestación.

² Estudio “Evaluación de deforestación con base en imágenes satelitales, composición y configuración del paisaje en la cuenca alta y media del río Cravo Sur.” realizado por Paola Johanna Isaacs Cubides, Héctor Mauricio Ramírez Daza para el IGAC.

1. ÁREA PROBLEMÁTICA

La cuenca del río Cravo Sur nace en la Cordillera Oriental en territorio Boyacense, en la parte baja presenta un tramo navegable de 138 Km que desemboca en el río Meta, es considerado entre los cuatro ríos con mayor caudal del Casanare con un caudal promedio de 151m³/s que ha ido disminuyendo perjudicando la navegabilidad en la parte de la desembocadura.

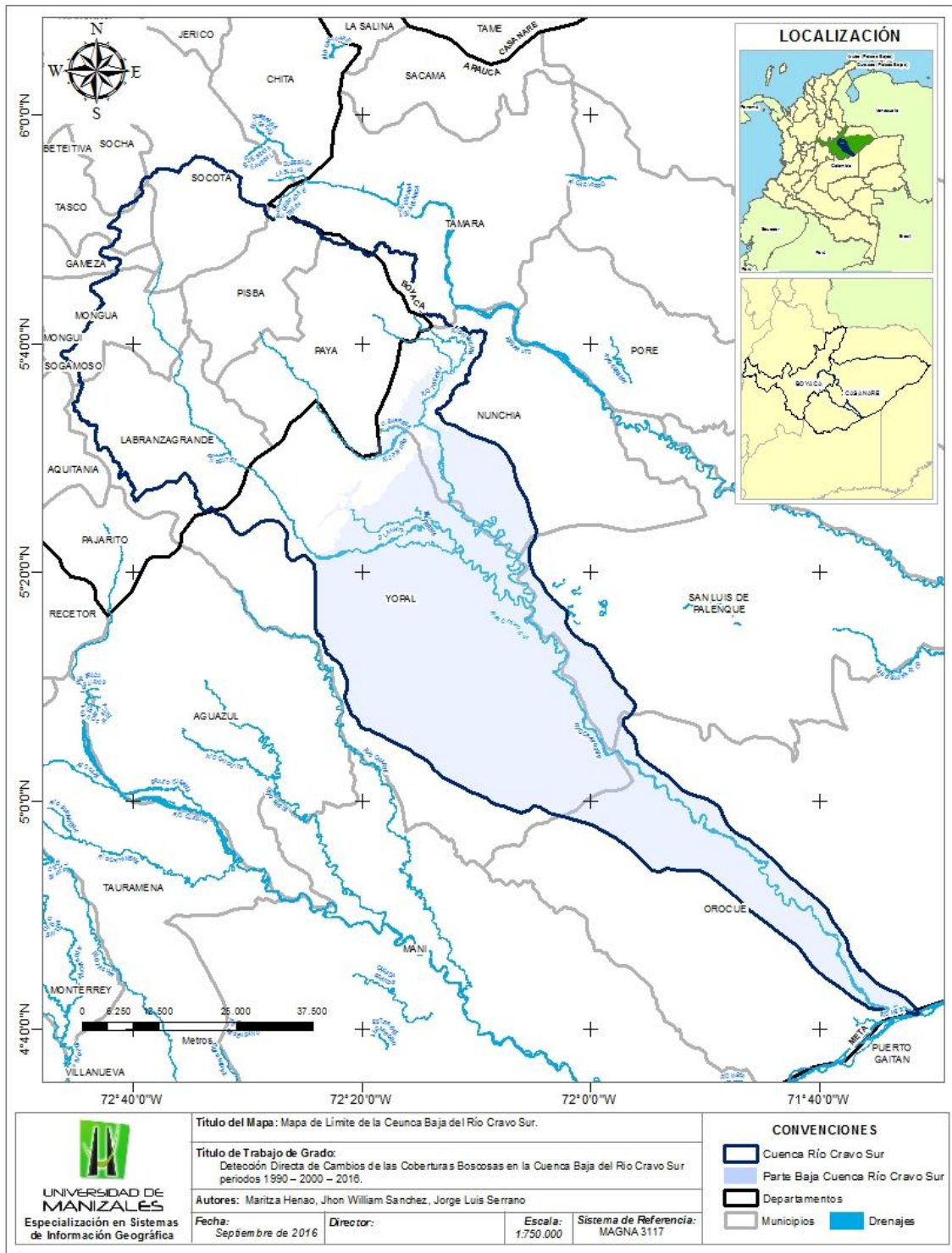
La cuenca alta, media y baja de este territorio presenta rangos altitudinales que van desde los 3800 hasta los 250 metros de altitud. Las zonas de baja densidad de población se distribuyen en los dos extremos de la cuenca donde las zonas de recarga sobre los 2700 metros de altitud que incluyen zonas de páramos y las zonas planas de la llanura desde los 250 metros de altitud. En la parte baja se observa con un patrón desordenado de drenaje no integrado, resultante de formas de suelo relativamente jóvenes, con topografía llana a suave y elevada capa freática, característica de las llanuras aluviales.

La parte baja de la cuenca, está ubicada dentro de los límites del Departamento del Casanare, y dentro de la cuenca se encuentra, toda la población urbana y gran parte de la población rural (139,736 habitantes)³ de Yopal, la capital del Departamento. También es en esta parte baja de la cuenca donde se desarrolla la mayor actividad agrícola, pecuaria e industrial de la capital y en menor proporción, actividades agropecuarias de los municipios de Nunchía, Orocué y San Luis de Palenque. Actividades como la ganadería extensiva, agricultura de arroz, caña, yuca y maíz principalmente.

Debido a las actividades antrópicas, la presión sobre los bosques es constante, aún más si se tiene en cuenta que la proporción de bosques en toda la cuenca es baja, y la mayoría es estos en la parte baja, solo se encuentran al borde de río Cravo Sur y sus afluentes. (Imagen 1.)

³ DANE, 2015.

Imagen 1. Localización de la Parte Baja de la Cuenca del Río Cravo Sur.



2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVO GENERAL.

Analizar los cambios espaciales de las coberturas bosques en la cuenca baja del Río Cravo Sur, a partir de la detección directa de los componentes principales de las imágenes Landsat, durante los periodos de 1990 a 2000 y 2000 a 2016.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Realizar el diagnóstico espacial del estado de los bosques en la cuenca baja del Río Cravo Sur, a partir del pre y procesamiento digital de las imágenes satelitales Landsat 5, 7 y 8.

Determinar la tasa de deforestación anual de la Parte Baja de la Cuenca del Río Cravo Sur durante los periodos 1990, 2000 y 2016 implementando el método de detección directa de cambios ACP.

Realizar un análisis comparativo de resultados de deforestación obtenidos, frente a los estudios y tasas de deforestación nacional y mundial.

3. JUSTIFICACIÓN

La Corporación Autónoma Regional de la Orinoquia (CORPORINOQUIA), como autoridad ambiental y administradora de los recursos naturales, ejecuta acciones de prevención, protección y conservación de estos recursos.

Corporinoquia debe atender y realizar la evaluación de solicitudes referentes a permisos y/o autorizaciones de aprovechamiento forestal según lo estipulado en el decreto 1076 de 2015 y debe prestar especial atención a posibles infracciones ambientales en el componente flora (como es la deforestación) según lo establecido en la ley 1333 del 2009; para contrastar estas acciones mediante lo autorizado y las acciones ilegales hace falta una visualización del avance de la deforestación a nivel regional, ya no se conoce en detalle la magnitud de este fenómeno

En la cuenca del río Cravo Sur ya se ha adelantado el proceso del plan de ordenación en el 2007, se realizó la detección de cambios de coberturas en las partes media y alta, que están dentro de la jurisdicción de la Corporación Autónoma de Boyacá. Sin embargo la parte baja, en jurisdicción de Corporinoquia no posee los estudios sobre la transformación espacial de los bosques, y se ha visto expuesta a las constantes solicitudes de aprovechamiento en áreas de importancia ambiental, lo que ha repercutido en la baja proporción que esta zona posee en bosques.

En la Cuenca, base para la economía del Municipio de Yopal Casanare, actualmente se desarrollan diferentes proyectos agroindustriales Palma de Aceite (*Elaeis guineensis*) a gran escala desarrollados por de empresas multinacionales como Manuelita S.A., Agroindustrial de Palma Aceitera S.A., Agroindustrial San Felipe S.A., entre otras. También se desarrollan proyectos de mejoramiento y ampliación de la infraestructura vial, ampliación de las redes eléctricas, bloques de exploración y perforación de hidrocarburos, que requieren la intervención de extensas áreas de cobertura vegetal para el desarrollo de los mismos. Por ende se hace pertinente estudiar los cambios que han venido presentando la coberturas boscosas desde 1990 al 2016, y que sobre su constante intervención han ocasionado y generando degradación y fragmentación que conllevan a otros problemas medioambientales.

4. MARCO TEÓRICO

4.1. LOS SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA (SIG)

Los SIG tienen la capacidad de almacenar, editar, analizar, compartir y mostrar la información georeferenciada; son herramientas informáticas que entre otras potencialidades, permiten crear consultas interactivas a los usuarios, analizar la información geoespacial, editar datos, y presentar los resultados de todas estas operaciones comúnmente en mapas, también desarrollados y editados con los software para SIG. (Casanova, 2014).

El uso de los SIG, de acuerdo con Olaya, surgen a partir de tres factores: la necesidad creciente de información geográfica, la gestión y uso óptimo de esta información, y la aparición de los primeros computadores. A principios de los 60, Roger Tomlinson desarrolla en Canadá el Canadian Geographical Information Systems (CGIS), una herramienta para el manejo de datos del inventario geográfico canadiense y su función era realizar el análisis para la gestión del territorio rural aunque de una manera análoga (Olaya 2009).

Paralelamente, en USA el Harvar Laboratory y en el reino unido en el Experimental Cartography Unit, se impulsaron las investigaciones que abrieron camino a los primeros software completos para SIG, pasando de la interpretación meramente visual que se utilizaba en el CGIS, para la codificación y almacenamiento de la información cartográfica y geográfica, estos desarrollos han sido la base para la afamada casa ESRI que aprovechó el desarrollo de la computación, el almacenamiento digital de datos, y empezó a comercializar a finales de los 60 los Software Arcinfo y Erdas, por otra parte en esa misma época también se desarrolló software libre Grass.

Entre otros hechos, en los 80 puede decirse se genera el “boom” de los SIG, el lanzamiento de satélites (Spot en los 80), la producción en masa y comercialización de los GPS, la expansión del internet, se obtuvo gran información de buena calidad y de grandes extensiones de la tierra y surgió así la necesidad de su procesamiento y análisis, adjunto a este avance en SIG, también vinieron los avances en procesos para análisis de la imágenes se sensores remotos, y se promovieron los software y el desarrollo tecnológico se hace mayor, los SIG dejan de ser sistemas completos y pasan a ser plataformas adaptables sobre las que construir soluciones particulares, los SIG se convierten en herramientas base para todo ese gran conjunto de disciplinas beneficiarias, cada una de las cuales adapta y particulariza estos a la medida de sus necesidades. (Olaya 2009)

Así entonces los SIG son una herramienta multidisciplinaria, si bien sus orígenes están íntimamente ligados a la gestión forestal o la planificación urbanística, ya hacen parte de la vida diaria gracias a empresas como Google, que han creado contenidos interactivos basados en la localización de las cosas y de las personas, tanto *Google Maps* como *Google Earth*, permiten una interacción de SIG básica pero que acerca más a los usuarios al desarrollo de contenidos y análisis. (Olaya 2009)

Estos sistemas aún siguen más vigentes que nunca y cada vez con mayores potencialidades y acercamientos en diferentes áreas del conocimiento no solo de la tierra, (Salud, administración, mercadeo, publicidad por mencionar algunas) pero sobre todo se potencializan y refuerzan en aspectos de las ciencias ambientales, planificación del territorio, biología, energía e infraestructura, planeación urbana y regional (Procesos de urbanización), monitoreo ambiental y geografía física, transportación y logística; cada vez con nuevas mejoras y adaptaciones a nuevas tecnologías de bases de datos.

Actualmente el conocimiento de la información y los diferentes aspectos de la tierra, los recursos naturales y la conservación, entre otros, han originado el impulso y el gran avance tecnológico que hoy se despliega en los software para SIG, la necesidad del conocimiento, de poder ver más de lo que por sí solo, alcanza a ver el hombre, es ver el mundo en contexto, que con ayuda de los SIG, se logra tener una imagen global al alcance de la mano.

4.2. COBERTURAS Y USOS DE LA TIERRA

Según Di Gregorio (2005), la Cubierta de la tierra es la cobertura (bio) física que se observa sobre la superficie de la tierra, también refiere a elementos antrópicos (construcciones, edificaciones, etc.); los afloramientos rocosos y los suelos desnudos, son la misma tierra expuesta y no una cobertura, tampoco los cuerpos de agua, aunque algunos autores los incluyen dentro de las jerarquías de las coberturas. Las coberturas también vienen siendo la expresión de las actividades humanas.

De acuerdo con Janssen (2000), el "Uso" de la tierra implica la utilidad que el humano le da a un tipo de cobertura para el uso, está directamente relacionado a su desarrollo y diario vivir, las funciones económicas de un espacio específico de la Tierra y con las actividades humanas (uso urbano, industrial, de reserva natural, etc).

“La tierra es la fuente básica de masa y energía presente en todos los ecosistemas terrestres y la cobertura y uso de la tierra representan los elementos integradores de los recursos base. La cobertura de la tierra, siendo la expresión de las actividades humanas, cambia con modificaciones en éstas. Por tanto, la cobertura de la tierra como un elemento geográfico explícito

puede formar una base de referencia para otras disciplinas” Di Gregorio (2005)

4.2.1. Clasificación de las Coberturas.

Para el IDEAM (1997) “la delimitación de las coberturas de la Tierra, describe la cobertura como la unidad delimitable que surge a partir de un análisis de respuestas espectrales determinadas por sus características fisionómicas y ambientales, diferenciables con respecto a la unidad próxima”.

Para Di Gregorio (2005), la clasificación de las coberturas de la tierra es una representación abstracta de lo que en realidad hay en el campo, bajo unos criterios de diagnóstico definidos, sin embargo, entre los académicos ninguna de las clasificaciones actuales han sido totalmente aceptadas a nivel internacional ya que veces las clases de coberturas definidas, han sido desarrolladas para propósitos o escalas específicos, por tanto no son aptos para todos los hemisferios.

Para la clasificación de las coberturas, Sokal (1974) lo define como "el arreglo u ordenamiento de objetos en grupos o conjuntos sobre la base de sus relaciones". Es un esquema sistemático con clases y criterios usados para distinguir los elementos asociados que cubren las tierra en relaciones entre clases, las clases tiene un límite que debe ser claro para el intérprete, preciso, cuantitativo y objetivo. Así pues, la clasificación depende del objetivo, de la metodología aceptada en la región, y en lo posible, debe estar avalada por las instituciones pertinentes.

En este trabajo se toma en cuenta la clasificación de coberturas bosque y No Bosque, según los criterios definidos la Metodología Corine Land Cover (CLC) adoptada para Colombia de acuerdo a la Leyenda Nacional de Coberturas 2010, en la cual define los bosques como “áreas naturales o seminaturales, constituidas principalmente por elementos arbóreos de especies nativas o exóticas. Los árboles son plantas leñosas perennes con un solo tronco principal o en algunos casos con varios tallos, que tiene una copa más o menos definida”.

La metodología CLC también tiene en cuenta los términos de la FAO (2001) que refiere a los bosques como una parte de la tierra con una cubierta de copa o grado de espesura de más del 10% del área y una superficie mayor a 0,5 Ha, están determinados por la presencia de árboles mayores a 5 metros de altitud y la ausencia de otro uso dominante de la tierra, se incluyen otras formas biológicas densas objeto de explotación forestal como palmas y guadua.

4.2.2. Los Bosques y sus Características

La mayoría de las definiciones de Bosques, datan a un conjunto de árboles en una porción de terreno, sin embargo estos conjuntos no son iguales en todas las regiones del mundo, los comportamientos ecológicos de las especies, las alelopatías y afinidades entre estas, dan como resultado un ecosistema complejo en todos los hemisferios de la tierra, los fenómenos naturales y los procesos e intervenciones antrópicas también influyen en lo que se visualiza, como un bosque en una región, así entonces no solo es un conjunto de árboles desarrollados, sino una sucesión natural, su regeneración hace parte de él, y puede estar asociado a arbustos, helechos, palmas o infinidad de especies del reino vegetal, es entonces que este ecosistema es complejo en su definición y descripción, y pasa a ser además un hábitat al que los profesionales le atribuyen diferentes funciones y servicios ambientales.

Según la FAO (FRA 2000), se define el bosque como:

“Tierra con una cubierta de copa (o su grado equivalente de espesura) de más del 10 por ciento del área y una superficie superior a 0,5 hectáreas (ha). Los árboles deberían poder alcanzar una altura mínima de 5 metros (m) a su madurez in situ. Puede consistir ya sea en formaciones forestales cerradas, donde árboles de diversos tamaños y sotobosque cubren gran parte del terreno; o formaciones forestales abiertas, con una cubierta de vegetación continua donde la cubierta de copa sobrepasa el 10 por ciento. Dentro de la categoría de bosque se incluyen todos los rodales naturales jóvenes y todas las plantaciones establecidas para fines forestales, que todavía tienen que crecer hasta alcanzar una densidad de copa del 10 por ciento o una altura de 5 m. También se incluyen en ella las áreas que normalmente forman parte del bosque, pero que están temporalmente desarboladas, a consecuencia de la intervención del hombre o por causas naturales, pero que eventualmente volverán a convertirse en bosque. Incluye: viveros forestales y huertos semilleros que forman parte integral del bosque; caminos forestales, senderos talados, cortafuegos y otras pequeñas áreas abiertas; bosques que integran parques nacionales, reservas de la naturaleza y otras áreas protegidas que sean de interés espiritual, cultural, histórico o científico; cortavientos y cinturones de protección formados con árboles, con una superficie superior a 0,5 ha y un ancho mayor a 20 m; plantaciones utilizadas principalmente para fines forestales, incluidas las plantaciones de árboles de caucho y rodales de alcornoque. Excluye: Tierras utilizadas primordialmente para prácticas agrícolas

4.3. INSIDENCIAS EN LAS COBERTURAS BOSCOSAS

4.3.1. Deforestación.

A lo largo de la historia, la mayoría de coberturas vegetales sobre la tierra han sufrido cambios, uno de los más evidentes es la pérdida de zonas boscosas conocida como Deforestación.

De acuerdo con la FAO (FRA 2000), la deforestación entendida como la eliminación de la cubierta forestal de un determinado sitio y orientada al cambio de uso de la tierra. Esto es debido a múltiples factores y actividades, entre las más comunes está el aprovechamiento de la madera.

Otros factores generan deforestación también están asociados a la expansión de las áreas agrícolas y ganaderas, la expansión de las ciudades que conlleva la construcción de vías puertos, aeropuertos, hidroeléctricas, la instalación de redes eléctricas y de telefonía, también el desarrollo de la minería, la extracción de hidrocarburos y problemas como los incendios forestales, las sequías, la tala ilegal y en algunos países, la expansión de los cultivos ilícitos comúnmente en zonas remotas y de difícil acceso. (Rautner et al. 2013).

Si bien es una actividad común, las consecuencias se han hecho cada vez más evidentes con el denominado cambio climático, solo en los países tropicales entre 1980 y 1995 se han perdido 13 millones de hectáreas por año según estudios de la FAO⁴, esta deforestación inyecta a la atmosfera cerca de 1.400 millones de toneladas de carbono/año, otras consecuencias de la deforestación según el Ph.D Julio César Centeno de la Universidad de los Andes de Venezuela, incluyen: “la pérdida del patrimonio biológico del país; aumentos en la frecuencia e intensidad de sequías e inundaciones, con daños a la producción agrícola, represas hidroeléctricas, sistemas de irrigación, vías de comunicación, empresas y hogares; erosión y pérdida de la fertilidad de los suelos; y crecientes dificultades en el suministro de leña, alimentos, medicinas, materiales de construcción y otros productos tradicionalmente suministrados por los bosques a comunidades indígenas y campesinas.”⁵

En este trabajo, para la identificación de los cambios de las coberturas boscosas por efecto de la deforestación en la cuenca baja del Río Cravo sur, se ha tomado como referencia la definición de deforestación de la FAO:

“Deforestación: Este término se refiere al cambio en el uso de la tierra que ha traído consigo la eliminación de la cubierta de copa (o grado de espesura), que se ha reducido a menos del 10 por ciento. Los cambios dentro de la clase forestal (por ej. de bosque cerrado a bosque abierto) que afectan

⁴ FAO – Forest Resource Assessment 1993, FAO – Forest Resource Assessment 1997).

⁵ Revista Forestal iberoamericana. Disponible en: <http://www.estrucplan.com.ar/articulos/verarticulo.asp>

negativamente el rodal o sitio y, en especial, disminuyen la capacidad de producción, se denominan degradación forestal.”

4.3.2. Regeneración

Como parte de los cambios que se generan en los bosques, y contrario a la deforestación, también se presenta natural o indicada por el humano, el proceso de regeneración de los bosques que la FAO la define como: “La recuperación de la cobertura de Bosque de zonas donde no estaba presente en fechas anteriores.”

4.3.3. Fragmentación

Es un fenómeno o consecuencia de la deforestación, consiste en la modificación de la estructura natural del paisaje y generalmente implica la pérdida de la continuidad espacial de los bosques. La fragmentación es de importancia ya que condiciona la efectividad de medidas de conservación y las opciones de manejo de posible aplicación. (Wilcove, D.S., McLellan. C.H. and Donbson A.P. 1986)

4.3.4. Cálculo de la Deforestación

Para la cuantificación de la deforestación y la evaluación de sus causas, se debe tener en cuenta que esto es un proceso de comparación a través del tiempo, donde la transformación del bosque ocurre debido a diferentes factores y a diferentes escalas. El valor de la deforestación determinado dividido entre el número de años del periodo, da como resultado la tasa promedio de deforestación anual.

Para esto, se debe tomar una zona de referencia y en ella identificar y cuantificar las zonas cubiertas de bosques (todos los tipos de acuerdo a la clasificación utilizada), compararlas con el bosque que había anteriormente y cuantificar, analizar de acuerdo a las nuevas coberturas por las que ha sido reemplazado el bosque para así determinar sus posibles causas y efectos. Estos procesos anteriormente se realizaban de manera análoga o visual, con cartografía en papel o fotografías aéreas y dependía de la experiencia del intérprete la identificación de las áreas boscosas.

Desde la década del 60, ha ido en aumento el interés en pérdida de bosques, y los SIG, no ajenos a esta problemática, se han convertido en las mejores herramientas para detectar los cambios en la tierra a la vez que unidos a algoritmos y modelos de otras áreas, ayudan a predecir las consecuencias negativas de la pérdida de la mayor cobertura vegetal de la tierra. En este caso, los SIG son herramientas que ayudan a determinar, predecir, cuantificar y manejar los recursos de una manera eficaz, que con ayuda de procesos de Teledetección, se pueden reconocer las áreas de mayor incidencia y afectación para gestionar los

recursos de los entes gubernamentales y ONG's en pro de la protección del medio ambiente. (Olaya, 2009).

En un caso análogo o visual, es fundamental el proceso de identificación de los bosques, la delimitación de las áreas y demás coberturas que dependen de la experiencia del intérprete. Por otra parte, la información que ofrecen las imágenes de sensores remotos son una buena fuente para el monitoreo de las coberturas vegetales en expresión espacial, temporal y a diferentes escalas. (Field et al., 1995; Colditz R. 2007).

En el caso de los SIG, para el cálculo de la deforestación lo más importante es el manejo de las imágenes fuente de la información, a las cuales se les deben realizar las respectivas correcciones, (atmosférica, calibración y ajuste radiométrico para minimizar las diferencias entre las imágenes debidas a condiciones atmosféricas, de brillo, iluminación, efectos de la topografía y demás distorsiones) utilizar los algoritmos apropiados que determinan los anchos de banda y rangos espectrales de las coberturas, y evaluar los valores de reflectancia y definición de umbrales que de acuerdo a la metodología de clasificación, definen las coberturas de bosque y No bosque en la zona de estudio. En este caso, los eventos de deforestación corresponden a las áreas clasificadas en la primera fecha como Bosque y en la siguiente como área sin Bosque (Cabrera et. al, IDEAM, 2011)

Por otra parte, la comparabilidad de las zonas siempre genera controversias en los estudios de deforestación, es por esto que los expertos siempre aclaran que los estudios de deforestación con diferentes metodologías no son correctos o errados, solo con cálculos hechos con un propósito, y no deben ser comparados con otros que correspondan a un propósito diferente. (Flamenco A., 2009).

4.4. DETECCIÓN DE CAMBIOS

En el proceso de la detección de cambios de coberturas de la tierra con imágenes de satélite, es un método comúnmente utilizado en el que se ejecutan algoritmos que permiten comprar la información radiométrica y espectral de las imágenes, detecta cambios directos e identifica las variaciones de los valores de radiancia de las imágenes en las fechas de comparación, se puede decir que un proceso de comparación post-clasificación de las imágenes.

Este proceso se realiza comparado los mapas de cobertura obtenidos de manera independiente para cada fecha (Coppin & Bauer, 1996; Hansen & Loveland, 2012; Théau, 2012) la exactitud del mapa de cambio depende de la exactitud de cada mapa de cada año de comparación, elaborado por separado, es decir la evaluación exhaustiva de diferencias radiométricas entre las imágenes (bosque, no Bosque), puesto que los errores en la clasificación y registro que estén presentes en los datos iniciales resultan críticos (Coppin & Bauer, 1996), y se

acumulan paulatinamente a medida que se incluye el análisis de un nuevo periodo.

De acuerdo con Cabrera (2011) Existen diversos métodos documentados para detectar cambios de manera directa: “Cálculo de la diferencia o cociente entre valores de las imágenes de una o más bandas o de índices de vegetación derivados (Coppin & Bauer, 1996; Hayes & Sader, 2001; Muchoney & Haack, 1994; Théau, 2012); análisis de vectores de cambio; regresión de imágenes; transformaciones lineales tales como Tasseled cap y análisis de componentes principales con matrices de varianza/covarianza o correlación (Coppin & Bauer, 1996; Fung & Ledrew, 1987; Hayes & Sader, 2001; Théau, 2012); clasificación directa multifecha que incluye análisis de compuestos, clasificación de cambio espectral-temporal y análisis de cambio de patrones espectrales, entre otras.”

Cabrera también menciona que es posible combinar dos o varios métodos para la mejora de resultados, para el caso de este trabajo, se utilizó el método de Análisis de Componentes Principales para la clasificación de las coberturas Bosque – No Bosque.

4.4.1. Análisis de Componentes Principales

El Análisis de Componentes Principales (ACP), es una técnica bastante empleada en ciencias sociales y naturales. Su objetivo es resumir la información contenida en un grupo amplio de variables en un conjunto, más pequeño, sin perder una parte significativa de la información (Chuvienco, 2006). El componente principal permite sintetizar las bandas originales, creando unas nuevas bandas, los componentes principales, que recojan la parte más relevante de la información original. Esta síntesis resulta muy conveniente cuando se pretende abordar un análisis multitemporal según Joly et al., 1983, citado por Chuvienco, 2006. La componente principal se incorpora como una banda de imagen más en los procesos de clasificación.

4.5. PLATAFORMA DE TELEDETECCIÓN LANDSAT

El Programa Landsat, inicialmente llamado ERTS-1 (Earth Resources Technology Satellite), desde 1972 constituye en una serie de misiones de lanzamiento de satelitales para la observación la tierra, ese programa es gestionado en conjunto por la NASA quien administra los satélites, y el Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS) quien se encarga de comercializar las imágenes captadas por cada sensor. Es el programa más largo en existencia para observar cambios y modificaciones que ocurren en la superficie terrestre a una escala moderada, actualmente la resolución de cada pixel de las imágenes alcanza a cubrir un estadio de Beisbol. (Cabrera, 2011).

Al último lanzamiento de satélite Landsat se le ha denominado Landsat 8 o “Landsat Data Continuity Mission” (LDCM), continúa en funcionamiento el Landsat 7, el Landsat 6 resultó un lanzamiento fallido, el Landsat 5 estuvo en funcionamiento hasta el 11 de noviembre de 2011, y sus predecesores (Landsat 1 a 4) ya no están en uso.

Con cada lanzamiento de la misión los satélites han presentado mejoras en tecnología, mejoras radiométricas, geométricas y espaciales a la vez nuevos sensores han sido incorporados con cada misión, ampliando así el rango de resolución espectral captada.

Las imágenes LANDSAT están compuestas por 7 u 8 bandas espectrales, que fueron elegidas especialmente para el monitoreo de la vegetación, para aplicaciones geológicas y para el estudio de los recursos naturales. Estas bandas pueden combinarse produciendo una gama de imágenes de color que incrementan notablemente sus aplicaciones.

4.5.1. Características de Landsat 5.

Posee un avanzado sensor de barrido TM Multiespectral, el cual proporciona una mayor resolución espacial, mejor discriminación espectral entre los objetos de la superficie terrestre, mayor fidelidad geométrica y mayor precisión radiométrica en relación con el sensor MSS del Landsat 4. Tiene una resolución espacial de 30 metros en las bandas del visible e infrarrojo medio y 120 metros en la banda del infrarrojo termal. La escena terrestre registrada por este sensor es también de 185 km.

Tabla 1. Características de las imágenes Landsat 5.

MODO ESPECTRAL	ESPACIAL (metros)	ESPECTRAL (micras)		RADIOMÉTRIC A	TEMPORAL
Multiespectral	30	Banda 1 azul:	0.45 - 0.52	8 BITS	16 Días
		Banda 2 verde:	0.52 - 0.60		
		Banda 3 roja:	0.63 - 0.69		
		Banda 4 Infrarrojo cercano1:	0.76 - 0.90		
		Banda 5 Infrarrojo cercano2:	1.55 - 1.75		
		Banda 7 Infrarrojo medio:	2.08 - 2.35		
Termal	120	Banda 6 Infrarrojo térmico:	10.4 - 12.5		

Fuente: Instituto Nacional de Estadística y Geografía de México, Inegi.

4.5.2. Características de Landsat 7.

Al igual que el Landsat 5, Tiene una resolución espacial de 30 metros posee las mismas bandas del TM, y un plus con longitud de onda de 0.5 - 0.90 con resolución espacial de 15 metros, la resolución radiométrica es de 8 Bits con un origen de datos de emisión para las bandas TM y plus de reflexión. Landsat-7 fue

diseñado para una vida útil de 5 años y tiene la capacidad de recolectar, así como transmitir hasta 532 imágenes por día. A diferencia de sus antecesores, Landsat 7 posee una capacidad de almacenamiento de 378 gigabytes, equivalente alrededor a 100 imágenes. El instrumento esencial a bordo del satélite es el Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+).

Tabla 2. Características de las imágenes Landsat 7.

MODO ESPECTRAL	ESPACIAL (metros)	ESPECTRAL (micras)		RADIOMÉTRICO A	TEMPORAL
Pancromática	15	Banda 8. Pancromática	0.52 - 0.90	8 BITS	16 Días
Multiespectral	30	Banda 1 azul:	0.45 - 0.52		
		Banda 2 verde:	0.52 - 0.61		
		Banda 3 roja:	0.63 - 0.69		
		Banda 4 Infrarrojo cercano 1	0.78 - 0.90		
		Banda 5. Infrarrojo cercano2	1.55 -1.75		
		Banda 6. Infrarrojo medio	2.09 - 2.35		

Fuente: Instituto Nacional de Estadística y Geografía de México, Inegi.

4.5.3. Características de Landsat 8.

El satélite Landsat 8 puede decirse que es el sensor más potente enviado por el proyecto Landsat, cuenta con dos instrumentos de barrido: Operational Land Imager (OLI), y un sensor térmico infrarrojo llamado Thermal Infrared Sensor (TIRS).

El sensor OLI, es similar al sensor Landsat 7 ETM +, sin embargo este tiene incorporada dos nuevas bandas espectrales: un canal profundo en el azul visible (banda 1) y un nuevo canal infrarrojo (banda 9). Estos están específicamente diseñados para la mejora en la detección de los recursos hídricos para la investigación en zonas costeras y para la detección de nubes cirrus respectivamente.

El Landsat 8 también está equipado con una nueva banda de control de calidad de datos incluida para cada producto generado. Esto permite mayor definición en presencia de nieves, agua o nieve en la atmosfera. Por otra parte el sensor TIRS recoge dos bandas espectrales en longitudes de onda incluidas por la misma banda en los anteriores sensores TM y ETM+ (Ariza. IGAC, 2013)

Tabla 3. Distribución de las bandas en OLI y TIRS en imágenes Landsat 8.

Landsat 8 Operational Land Imager (OLI) and Thermal	ESPECTRAL (micras)		Resolución (metros)
	Banda 1 - Aerosol costero	0.43 - 0.45	30
	Banda 2 - Azul	0.45 - 0.51	30
	Banda 3 - Verde	0.53 - 0.59	30

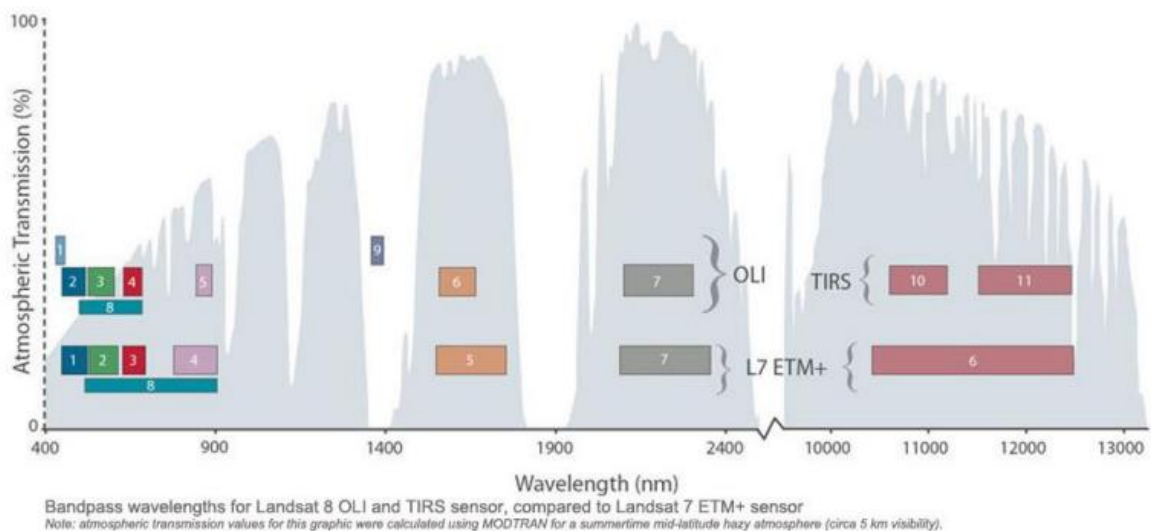
Infrared Sensor (TIRS)	Banda 4 - Rojo	0.64 - 0.67	30
	Banda 5 - Infrarrojo cercano (NIR)	0.85 - 0.88	30
	Banda 6 - SWIR 1	1.57 - 1.65	30
	Banda 7 - SWIR 2	2.11 - 2.29	30
	Banda 8 - Pancromático	0.50 - 0.68	15
	Banda 9 - Cirrus	1.36 - 1.38	30
	*Banda 10 - Infrarrojo térmico (TIRS) 1	10.60 - 11.19	100
	*Banda 11 - Infrarrojo térmico (TIRS) 2	11.50 - 12.51	100

Fuente: USGS, 2013.

4.5.4. Identificación de los bosques

Las diferentes bandas de los satélites Landsat captan diferentes ondas de reflectancia de los objetos de la tierra, sin embargo no todas las bandas captan los mismo niveles, con el pasar del tiempo las mejoras en los satélites han sido evidente y poder distinguir infinidad de tonalidades es el objetivo clave en la competencia por ofrecer la mejor información de la tierra, incluso bajo condiciones de sombras, presencia de nubosidad y factores ambientales que dificultan la diferenciación de los objetos, estos satélites con capaces de separar y captar la información. Aunque el Landsat 5 y 7 captan longitudes de ondas semejantes y con el mismo número de bandas, Landsat 8 posee otros canales que redistribuye sus sensores de captación de longitudes de onda que se presentan en la siguiente imagen.

Figura 1. Ancho de banda para los sensores OLI y TIRS en Landsat 8 y ETM+ en Landsat 7.



Fuente: USGS, 2013.

4.5.5. Tratamientos y procesamiento de las Imágenes Landsat

Se le denomina tratamiento digital de imágenes satelitales, a las actividades que en el procesamiento se deben realizar en la imagen, cuyo objetivo es la obtención de las propiedades de la imagen que a través del cálculo entre bandas, permite la obtención los valores propios de las coberturas de interés (Cabrera, 2011). Por lo tanto, de acuerdo con Cabrera (2011) a las imágenes se les debe realizar los siguientes tratamientos:

- Definición del sistema de Coordenadas y/o realización de los proceso de georreferenciación acorde con los parámetros estándares, en el caso de Colombia se utilizó el sistema de Referencia Magna Sirgas.
- Verificación y corrección de bandeamiento de las imágenes.
- Verificación de Metadato con toda la información pertinente a la imagen, y a cada una de las bandas para los cálculos y análisis necesario.
- Delimitación del área de estudio y proceso de conversión de los niveles digitales de la imagen a valores de reflectancia.
- Realización de Layer Stack; Unificación de las bandas en un solo archivo.
- Subset de la Imagen, para delinear el área de trabajo y evitar traslapes de información espectral de pixeles fuera del área de estudio.

5. METODOLOGÍA

La detección directa de cambios a partir de información remota del sensor Landsat 5, 7 y 8, es un método de uso común en el análisis de las dinámicas espaciales de las coberturas. La comparación post-clasificación, también llamada clasificación delta, se realiza comparando coberturas obtenidas de manera independiente para distintas fechas (Coppin & Bauer, 1996; Hansen & Loveland, 2012; Théau, 2012). El método considera las diferencias radiométricas de las imágenes y los resultados dependen de la exactitud de los productos generados por separado, lo que requiere de gran precisión en la identificación de las unidades de cada momento, puesto que errores en la clasificación inicial son acumulativos para los siguientes periodos (Coppin & Bauer, 1996).

Para la realización de la investigación se consideró la incorporación de aspectos del protocolo de Cabrera, Galindo y Vargas (2011) “Protocolo de procesamiento digital de imágenes para la cuantificación de la deforestación en Colombia a Nivel Nacional - Escala gruesa y fina” como también la segunda versión del mismo, creada por Galindo *et al.*, e IDEAM (2014) “Protocolo de Procesamiento Digital de Imágenes para la Cuantificación de la Deforestación en Colombia a Nivel Nacional”. Es necesario señalar que los planteamientos expuestos por los autores anteriores no corresponden a una metodología, sino que son unos lineamientos para el procesamiento digital de imágenes de sensores remotos, con la finalidad de optimizar procesos técnicos y garantizar la producción de información eficaz y oportuna.

El presente estudio realizó la detección directa de cambios y posterior comparación de unidades de bosque y no bosque a partir del análisis de las respuestas espectrales de las coberturas, que pudiesen corresponder a bosques estables, pérdidas o ganancias. Para la detección directa fue necesario aplicar procesos de corrección de los valores digitales de las imágenes “ND” a valores de reflectancia, con el objetivo de minimizar las diferencias entre las imágenes a causa de las condiciones atmosféricas, iluminación, brillo, efectos de la topografía y otro tipo de distorsiones (Coppin & Bauer, 1996; Hansen & Loveland, 2012; Théau, 2012).

Esta investigación otorgó prelación al método directo Análisis de Componentes Principales, método automático y/o semiautomático en el procesamiento de imágenes Multiespectral, (Coppin & Bauer, 1996; Fung & Ledrew, 1987; Hayes & Sader, 2001; Théau, 2012). Con la finalidad de generar cartografía temática referida a extensión, distribución y cambios de unidades boscosas en la cuenca baja del río Cravo Sur. (Figura 2)

Figura 2. Modelo metodológico del trabajo.



Fuente: Autores.

Para realizar la estimación de las unidades boscosas en la cuenca baja del Río Cravo Sur, y posterior cálculo de deforestación durante los periodos comprendidos de 1990 a 2000 y 2000 a 2016, se consideró y llevó a cabo las siguientes etapas.

5.1. FASE I. Área de estudio.

Se consideró el límite oficial para el país de sub-zonas hidrográficas, delimitación oficial en el cual se establece como unidad independiente a la cuenca del Río Cravo Sur; dicha adopción hidrográfica para el estudio se soportan en la coherencia con la Política Nacional para la Gestión Integral del Recurso Hídrico – PNGIRH (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2010), mediante la cual se establece la estructura para la planificación, ordenación y manejo de cuencas hidrográficas por unidades hidrográfica con características climáticas similares con el fin de la implementación de planes de ordenación y manejo de cuencas “POMCA” establecido en el Decreto 1640 de 2012.

5.2. FASE II. Delimitación de la cuenca baja.

Para determinar la cuenca baja, se descargó el modelo de elevación digital (DEM) de la Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio (NASA) de resolución espacial de 30 m x 30 m. Se procesó el DEM en el software ArcGIS dentro de la

herramienta de hidrología, obteniendo las curvas de nivel, forma de relieve y mapa de pendientes.

Con base en las principales características morfo-métricas, se definió la cuenca baja de acuerdo a parámetros altitudinales y topográficos. Como la cuenca presentó una variación de 0 a 2500 metros de altitud, fue posible definir las tres partes de la cuenca. El segundo parámetro para definirla, fue con base en el relieve y formas del terreno. Para tal efecto se consideró como cuenca baja el área donde no había una fuerte presencia de montañas, laderas y demás superficies onduladas, enfatizando en las parte planas, que formas los valles. Para ello se consideró la cuenca baja, objeto de estudio a partir de la Cota 450 metros de altitud y demás formas del terreno con pendientes inferiores a 5%.

5.3. FASE III. Búsqueda de Imágenes.

Posterior a la delimitación de la cuenca baja, se procedió a la búsqueda y descarga de las imágenes satelitales gratuitas disponibles del sensor Landsat en el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS). La búsqueda se efectuó a partir del Path y Row, la selección de las imágenes se basó en la menor periodicidad posible entre las imágenes que compondrían los mosaicos, al igual que el menor porcentaje de nubosidad (Tabla 4).

Tabla 4. Información de las imágenes Landsat.

Imagen Landsat	Fecha de adquisición	Angulo solar	Angulo cenital solar	Angulo Cenital radianes	Día juliano	Distancia Tierra - sol
LC80060572016025LGN00	25/01/2016	52,884	37,116	0,648	25,000	0,969
LC80070562016016LGN00	16/01/2016	51,329	38,671	0,675	16,000	0,968
LE70060572000005EDC00	05/01/2000	50,584	39,416	0,688	5,000	0,967
LE70070562000348EDC00	13/12/2000	50,745	39,255	0,685	353,000	0,968
LT50060571990001XXX04	01/01/1990	45,095	44,905	0,784	1,000	0,967
LT50070561989357CPE00	23/12/1989	44,954	45,046	0,786	342,000	0,970

5.4. FASE IV. Pre-procesamiento de las imágenes.

Esta fase comprendió la conversión de los niveles digitales (ND) a valores de radiancia y posterior a reflectancia espectral de las superficies terrestres y corrección de los efectos atmosféricos; esto dado a que los ND son valores crudos que no corresponden a valores biofísicos. Dicho proceso permitió una mayor consistencia radiométricas en las respuestas espectrales de las imágenes, para posterior aplicación de procesos estándar para todas las escenas y fechas analizadas (Hansen & Loveland, 2012). Ese proceso no se realizó para las

imágenes que comprenden la longitud de onda del infrarrojo térmicos, y para los datos de Landsat 8 OLI las que comprenden lo aerosoles y cirrus; porque dicha información no está disponible para todas las escenas del sensor Landsat 5 y 7. El proceso anterior fue necesario debido a que eliminó las anomalías capturas por el sensor y almacenadas en las imágenes, por causa de factores como la localización, la radiometría de los píxeles, Chuvieco (2008).

Para ellos fue necesario el tratamiento previo en las imágenes, para garantizar que los datos queden lo más cercano a una adquisición idónea.

Pre-procesamiento imágenes Landsat 5 y 7

Para convertir los valores ND a reflectividades se requirió en primer lugar transformar los valores de radiancia $L_{sen,k}$ a partir de los coeficientes de calibrado del sensor para obtener de esta radiancia la reflectividad $p * _k$, conociendo la irradiancia solar $E_{o,k}$, la fecha de adquisición de la imagen, se estima D y el ángulo cenital θ_i

$$L_{sen,k} = \frac{E_{o,k} * Cos\theta_i * P *_k}{D_{\pi}}$$

El proceso de calibración radiométrica, se realizó mediante el método de ganancias y sesgo, el cual calcula la radiancia espectral recibida por el sensor.

$$L_{sen,k} = a_{o,k} + a_{1,k} * ND_K$$

Donde $L_{sen,k}$ corresponde a la radiancia espectral recibida por el sensor en la banda $k(en Wm^{-2}sr^{-1}mm^{-1})$; $a_{o,k}$ y $a_{1,k}$ son los coeficientes de calibración para esa banda, y ND_K corresponde a nivel digital de la imagen en la misma banda.

Tabla 5. Parámetros para la conversión a reflectividades de imágenes Landsat.

Banda	Eo. K (w m ² Um ⁻¹)	Valores metadato de la imagen				Valores calibrados				Tki
		Landsat-5 TM		Landsat-7 ETM+		Landsat-5 TM		Landsat-7 ETM+		
		a0, k	a1,k ¹	a0, k	a1,k ¹	a0, k	a1,k ¹	a0, k	a1,k ¹	
Banda 1	1957	-	0,671	-6,97874	0,779	-1,52	0,602	-6,2	0,786	0,7
Banda 2	1829	-	1,322	-7,19882	0,799	-2,84	1,175	-6	0,817	0,78
Banda 3	1557	-	1,044	-5,62165	0,622	-1,17	0,806	-4,5	0,639	0,85
Banda 4	1047	-	0,876	-6,06929	0,969	-1,51	0,815	-4,5	0,635	0,91
Banda 5	219,3	-	0,120	-1,12622	0,126	-0,37	0,108	-1	0,128	1
Banda 7	74,52	-	0,066	-0,39390	0,044	-0,15	0,057	-0,35	0,044	1

Fuente: valores de los metadatos de las imágenes. Valores de irradiancia solar (Price, 1987). Parámetros de calibración Chander et al. (2004). Citados en Chuvieco (2008).

El cálculo del factor corrector de la distancia Tierra-Sol, se determinó mediante la siguiente formula.

$$D = \left(1 + 0,01674 \left(\text{sen} \left(\frac{(2\pi(J - 93,5))}{365} \right) \right) \right)^2$$

Donde J indica el número de día del año y el seno se asume en radianes, este factor varía entre 0,983 (3 de enero en el perihelio) y 1,017 (4 de julio en el afelio), considerando la distancia en que la tierra está más cerca o alejada del sol.

Para el cálculo de la reflectividad aparente se utilizó la siguiente formula:

$$P^*_k = \frac{D\pi L_{sen,k}}{E_{o,k} * \cos\theta_i}$$

A partir de las consideraciones de Chuvieco (2008), la transformación de los ND a reflectividad aparente únicamente modifica las diferencias de calibramiento entre bandas de la misma imagen y cambia la escala de medición del parámetro físico, pero no permite corregir efectos atmosféricos, o aquellos debidos a la influencia de cubiertas vecinas, ángulos de observación o condiciones de iluminación.

Para el cálculo de la corrección atmosférica, se considera el método basado en objetos oscuros de Chávez (1996) citado en Chuvieco (2008), el cual considera como alternativa a la corrección del coseno. Sugiere emplear unos valores de transmisividad estándar, $t_{k,i}$ de 0,73 banda 1; 0,79 banda 2; 0,85 banda 3; 0,91 banda 4; 0,95 banda 5 y 0,97 banda 7 (Gilabert et al 1994). Para el cálculo de la radiancia atmosférica debido a la dispersión $L_{a,k}$, se propone que estimarla a partir de los valores mínimos o de reflectividad nula, siendo $L_{a,k} = a_{o,k} + a_{1,k} * ND_{mínimo}$.

Los valores calibrados de $E_{o,k}$ valores de irradiancia solar, se tomaron de Price (1987) citados en Chuvieco (2008), con valores de 1957 banda1, 1829 banda 2; 1557 banda 3; 1047 banda 4; 219,3 banda 5 y 74,52 banda 7.

$$P_k = \frac{D\pi(L_{sen,k} - L_{a,k})}{E_{o,k} * \cos\theta_i * t_{k,i}}$$

Figura 3. Valores de la radiancia atmosférica

Bandas	ND mínimo	k	Eo. K * Cos Angulo	Eo. K * Cos Θ *Tki
1	65	37,61	1386,10	970,27
2	24	25,36	1295,44	1010,44
3	18	13,338	1102,79	937,37
4	10	6,64	741,57	674,83
5	3	-0,046	155,33	155,33
7	1	-0,093	52,78	52,78

Bandas	ND mínimo	k	Eo. K * Cos Angulo	Eo. K * Cos Θ *Tki
1	36	20,15	1382,70	967,89
2	11	10,09	1292,26	1007,96
3	7	4,47	1100,08	935,07
4	6	3,38	739,75	673,17
5	5	0,17	154,94	154,94
7	2	-0,04	52,65	52,65

Fuente: Autores

Pre-procesamiento de imágenes Landsat 8

Como ya se ha descrito en apartados anteriores, las imágenes Landsat 8 difieren en información con base en las demás imágenes, caso Landsat 7 y 5. Como primera medida es necesario convertir a radiancia en el techo de la atmosfera "TOA" los ND. Para efectuar las respectivas corrección se consideró la propuesta de Ariza e IGAC (2013).

$$L\lambda = ML Q_{cal} + AL$$

$L\lambda$ = Es el valor de radiancia espectral en el techo de la atmosfera (TOA) medida en valores de (Watts /m2 * srad * μ m))

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

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

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

Es relevante considerar que las imágenes Landsat 8 presentan una radiometría de 16 bit, por lo que las nuevas bandas tendrán valores de radiancia de 32 bit, para efectos de no permitir la pérdida de información.

Para realizar la conversión a reflectancia TAO en el techo de la atmosfera, se usaron los coeficientes de reflectancia reescalados, información contenida en el

metadato de la imagen. Para efecto de los cálculos de los ND a valores de reflectancia se usó la siguiente ecuación

$$P\lambda' = M_p Q_{cal} + A_p$$

Dónde: $P\lambda'$ = Es el valor de reflectancia planetaria, sin corrección por ángulo solar. Note que $P\lambda'$ no contiene una corrección por el ángulo solar.

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

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

Q_{cal} = Es el producto estándar cuantificado y calibrado para valores de pixel (DN). Este valor se refiere a cada una de las bandas de la imagen.

A partir del cálculo anterior se procedió a la conversión a reflectancia TAO, con corrección angular, con el fin de obtener la reflectancia real del cuerpo, por el sensor. Así la reflectancia en el techo de la atmósfera con corrección para el ángulo se determinó mediante la siguiente ecuación.

$$P\lambda = \frac{P\lambda'}{\cos(\sigma_{sz})} + \frac{P\lambda'}{\sin(\sigma_{se})}$$

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

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

Θ_{sz} = Es el ángulo solar zenith local.

Es el ángulo solar zenith local, corresponde al ángulo complementario de observación y puede obtenerse de la siguiente manera: $\Theta_{sz} = 90^\circ - \Theta_{se}$.

A partir de lo anterior, la ecuación general para realizar la conversión a reflectancia, considerando la corrección por ángulo es la siguiente:

$$P\lambda' = \frac{M_p Q_{cal} + A_p}{\sin(\sigma_{se})}$$

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

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

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

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

Q cal = Es el producto estándar cuantificado y calibrado para valores de píxel (DN). Este valor se refiere a cada una de las bandas de la imagen.

Posterior a las correcciones anteriores, se efectuó el ajuste geométrico, a partir del cual las imágenes fueron reproyectadas al sistema de referencia geográfico Magna Colombia Este 3117, proyección Transversal de Mercator. Posterior a la reproyección de las coordenadas se realizó la validación y ajuste en la exactitud geométrica de las imágenes, apoyado en la cartografía local; evidenciando que los productos Landsat presentan una buena correspondencia exacta de píxeles.

5.5. Fase V. Procesamiento digital de las imágenes.

Posterior a la selección, descargue y corrección de las imágenes satelitales, se inició el procesamiento digital para realizar la estimación de la cobertura boscosa en la cuenca baja del río Cravo Sur. Para efectos del estudio no se realizó el enmascaramiento de nubes y cuerpos de agua, puesto a que el método propuesto pretende homogeneizar toda la información redundante, permitiendo determinar una mayor diferenciación de los componentes.

En el desarrollo metodológico se realizó la identificación de coberturas boscosas a nivel de imagen, considerando que estas presentan tres tipos de influencias que ocasionan variaciones significativas en la información de cada una. Una de ellas son los cambios estacionales o cíclicos, definidos por los periodos de lluvia y sequía, afectando la respuesta espectral; otros son los cambios graduales dados por variaciones en la precipitación media o eventos climáticos interanuales y en última medida los cambios abruptos naturales o de origen antrópicos, como inundaciones, incendios o eventos de deforestación (Verbesselt et al., 2012).

Se efectuó el apilado de las bandas que componen una imagen, de tal manera que se generaron los componentes principales de manera independiente para cada escena y fecha. A partir de los resultados del método directo de Análisis de Componentes Principales, se realizó la determinación y extracción de clases a partir del rango de umbrales de bosque y no bosques de superficies de reflectancia, obteniendo la información de las coberturas correspondientes a bosque, y no bosques; por último se transformaron las unidades de bosque de

formato raster a shape. Con las coberturas en formato shape se realizó la unión de las capas del mismo periodo. Se efectuó la comparación entre unidades definidas mediante un proceso de superposición de capas, determinando los bosques estables, deforestación y ganancias para el periodo de 1990 a 2000 y 2000 a 2016.

5.6. FASE VI. Evaluación de la Exactitud temática.

Para efectos de la presente etapa se realizó la verificación visual de los cambios detectados a partir de un muestreo aleatorio, con base en el número de polígonos delimitados en los mapas; de este modo las coberturas determinadas en la fase anterior, fueron verificados a partir de la observación de la tierra a través de los productos de la percepción remota, de alta, media y baja resolución, con el objetivo de identificar y caracterizar las áreas dinámicas. Para realizar la verificación de la dinámica forestal, se accedió al repositorio de imágenes satelitales del servicio Google Earth, en el cual se corroboraron y descartaron áreas detectadas como ganancias a través de la superposición de mapas de coberturas. Finalmente las inconsistencias fueron reclasificadas a la clase correspondiente.

6. RESULTADOS

De acuerdo a los procedimientos realizados, se evidenciaron cambios en las coberturas boscosas entre 1990, 2000 y 2016. Los procesos de transformación de los bosques han sido constantes, en términos generales se encontró un balance positivo pues los bosques han tenido un aumento progresivo desde 1990 al 2016. (Tabla 6). Sin embargo, los procesos de pérdidas aunque no han reducido el área total de los bosques, si se han hecho evidentes modificando constantemente el paisaje y la distribución espacial de los bosques. (Imagen 2 y 3).

Se determinó que en la parte baja de la cuenca se han presentado diferentes focos de deforestación, con dinámicas de pérdidas del 39,62% (12507,96 Ha.) entre 1990 y el 2000 y del 39,12% (12832,37 Ha.) entre el 2000 y 2016 (Anexo A, B y C). Esto significa una tasa de deforestación anual de 833,86 Ha/año para el periodo 1990 – 2000 y de 802,02 Ha/año para el periodo 2000 – 2016. Es decir que en promedio cada año se pierde el 2,5% de los bosques (Tabla 7), esto es aproximadamente el equivalente a 1145 canchas de fútbol.

Aunque las pérdidas de bosque están cercanas al 40%, también han habido ganancias considerables de las coberturas boscosas en mayor proporción, los bosques han pasado de tener 31565,72 Ha. en 1990 Ha, a 32802,03 Ha. en el 2000 y a 34034,11 Ha. en 2016, lo que representa una ganancia neta de 2468,39 Ha. (7,81%) respecto a la cobertura de 1990, es decir, un aumento anual promedio de 0,31% (98,73 Ha/año).

Sin embargo los procesos de transformación del bosque en cuanto a ganancia de territorios es más dinámica, si bien ha habido procesos de pérdidas al mismo tiempo se han regenerado o recuperado más zonas que las pérdidas. Las ganancias del bosque entre 1990 y el 2000 fueron de 13744,27 (43,542%) y de 14064,45 (42,877%) entre el 2000 – 2015. Como se puede observar con estas cifras, aunque los valores de ganancias son positivos, en el primer periodo de 10 años (1990 – 2000) la tasa de ganancias fue de 4,35% anual (1374,43 Ha/año), y en el segundo periodo de evaluación de 16 años (2000 – 2016), la tasa de ganancias redujo considerablemente a 2,68% anual (879,03 Ha/Año).

Tabla 6. Balance General de coberturas de la Cuenca Baja del Río Cravo Sur, Periodos 1900 - 2000 - 2015

Área de la Cuenca Baja: 260203,19													
Año	Bosque (Ha)	No Bosque (Ha)	Bosque (%)	No Bosque (%)	Ganancias (Ha)	Ganancia Neta (%)	Ganancia Neta Anual (Ha)	Ganancia Neta Anual (%)	Pérdidas (Ha)	Pérdida Neta (%)	Pérdida Neta Anual (Ha)	Pérdida Neta Anual (%)	Bosques Estables (ha)
1990	31565,72	228637,47	12,13	87,87									
2000	32802,03	227401,16	12,61	87,39	1236,31	3,92	123,63	0,39	12507,96	39,63	1250,80	3,96	19057,76
2016	34034,11	226169,08	13,08	86,92	1232,08	3,76	77,00	0,23	12832,37	39,12	1283,24	2,45	19969,66

Tabla 7. Tasas de deforestación anual para Colombia según autores.

Deforestación anual en Hectáreas			
Cabrera	FAO	Jean-Ph	Sader et al
3,96	-4,92	-5,05	4,95
2,45	-3,05	-3,10	4,89

Imagen 2. Cambios en la Cobertura Boscosa de la parte Baja de la Cuenca del Río Cravo Sur, Periodo 1990 - 2000.

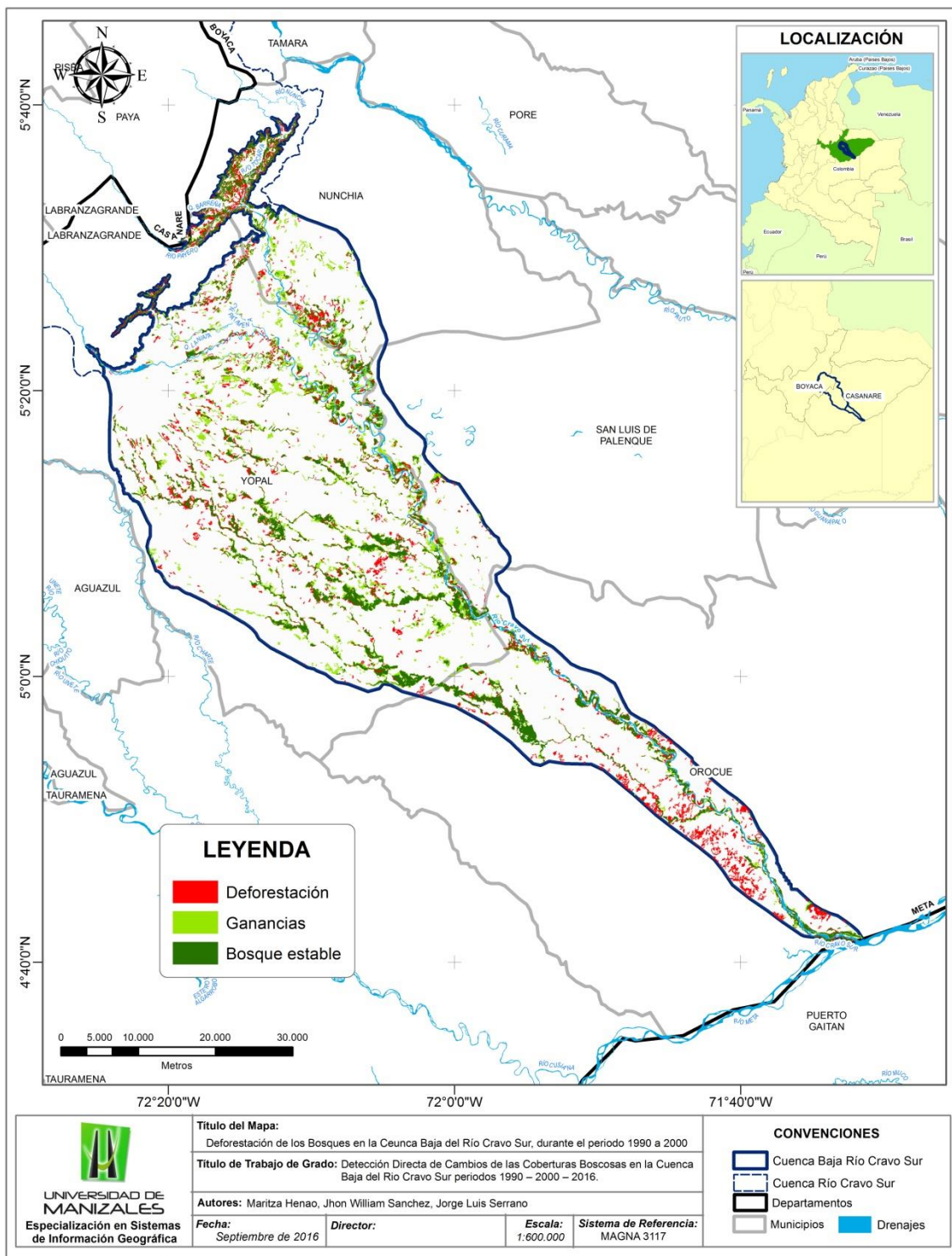
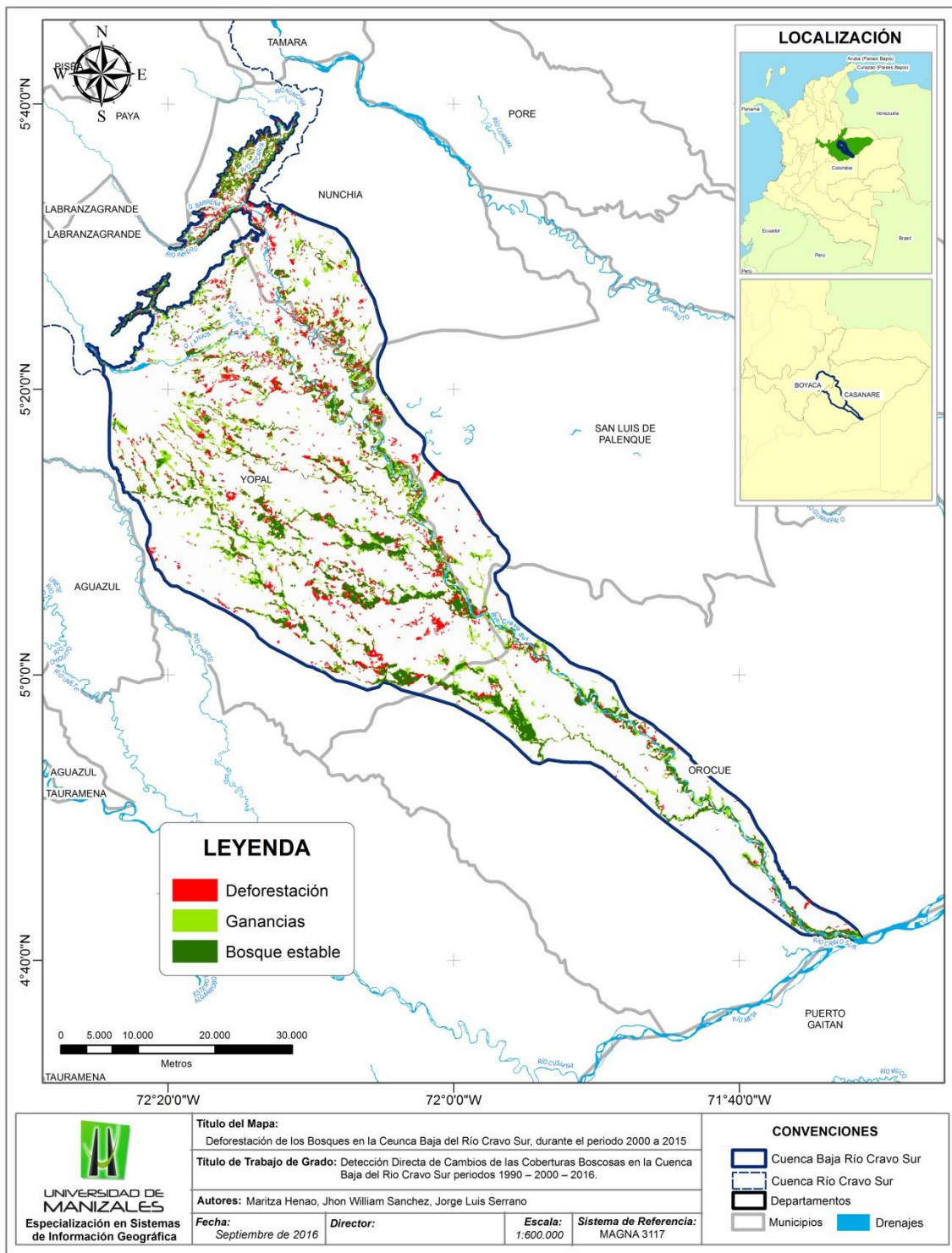


Imagen 3. Cambios en la Cobertura Boscosa de la parte Baja de la Cuenca del Río Cravo Sur, Periodo 2000 - 2016.



7. DISCUSIÓN

A partir del estudio realizado por Hansen *et al.*, (2013) donde se realizó la estimación de la cubierta forestal a nivel mundial para el siglo 21, mediante la construcción de mosaicos con imágenes de resolución espacial de 30 metros durante el periodo comprendido del año 2000 a 2012, se determinó que la parte baja de la cuenca del río Cravo Sur presento una deforestación anual de 605,47 hectáreas para un total de 7265,61 Ha. durante los 12 años.

En comparación con los resultados obtenidos en la investigación, se determinó que anualmente durante el periodo comprendido del año 2000 a 2016 se deforestó 802,02 ha de bosque, un total de 12832,37 Ha. En un periodo de 16 años. La tasa anual entre las dos estimaciones presenta una diferencia de 196,56 Ha. por año, diferencia que puede ser explicada por los sucesos ocurridos en la parte baja de la cuenca Río Cravo Sur, durante el periodo de sequía e incendios que afronto el Casanare en el 2014, fenómeno que consumió gran cantidad de hectáreas de bosque. (Anexo D)

Con base en los resultados obtenidos en la investigación y los publicados por Cabrera et al, IDEAM (2011), se contrasta que la parte baja de la cuenca ha presentado un alto porcentaje de deforestación durante el periodo de 1990 al 2000, considerando que comprende el 5,8% del área total del departamento del Casanare y sufrió una deforestación de 1250,8 ha al año, lo que implica un porcentaje de 23,4% respecto al total del departamento (Tabla 8). Es importante señalar que el Casanare se destaca por ser una sábana con 7 ríos principales y cuya cobertura forestal se relaciona a bosques de galería. Por lo que se puede decir que los procesos de deforestación están directamente relacionados con las áreas próximas a los cuerpos de agua, lo que explica la alta participación de la parte baja de la cuenca del río Cravo Sur con relación a la deforestación anual en todo el departamento. (Tabla 8)

Tabla 8. Resultados de Tasa de Deforestación para el Casanare según el IDEAM, 2012

CASANARE						
Periodo	Bosque estable	No Bosque estable	Def.	Reg.	Sin información	Deforestación Anual
1990 -2000	516059.1	3760813.44	53438,76	51111,45	72527,76	5343,876
2000 -2005	507334.05	3788888.67	35510.31	12879.45	109338.03	7102,062
2005-2010	477191.43	3758774.31	19944.18	1697.85	196342.74	3988,836

Def: deforestación; Reg: regeneración
Fuente: Cabrera et al. IDEAM (2011).

Haciendo una comparación análisis general, En 25 años los bosques de la cuenca baja del Río Cravo Sur han presentado una ganancia Neta de 7,81% es decir 2468,39 Hectáreas, sin embargo la deforestación ha sido constante, que aunque no representa pérdidas de bosque si refleja transformaciones en paisaje, la ganancia por acciones de la regeneración natural y medidas de protección y restauración en la zona, no han sido acompañadas de disminución de la deforestación que en los dos periodos analizados, se han mantenido (39,625% y 39,121% respectivamente), lo que evidencia la constante presión de los bosques y la necesidad de que la Autoridad Ambiental, ayude a mitigar la fragmentación y perdidas constantes de los bosques.

De acuerdo a la tasa de deforestación (cerca al 40%), y por la ubicación de los bosques en cercanías a los ríos, estos bosques de galería o riparios se ven sometidos a constantes cambios y pérdida de especies valiosas, cabe resaltar que en estas zonas se encuentran alrededor de nueve (9) especies forestales en amenaza y que los procesos de conversión agudizan la pérdida de hábitat de estas especies, pues va transformando el bosque primario a relictos de bosque como se evidencia en los mapas de resultados, esto además modifica los microclimas necesarios para la regeneración natural.

Es necesaria la verificación en campo de los puntos deforestados y las unidades de bosques definidas, haciendo énfasis en aquellas áreas donde se presentaba cierto grado de incertidumbre, para lograrlo, se consideraron las recomendaciones expuestas por González et al. (2014) para la verificación de cambio, en la generación de mapas de coberturas.

8. CONCLUSIONES

El método de Análisis de Componentes Principales, a partir de la conversión de los ND a valores de reflectancia de la superficie y mediante el procesamiento individual de las bandas y posterior agrupación de las mismas para cada escena, permite discriminar los bosques con relación a otras coberturas.

La determinación de las dinámicas espaciales a partir de imágenes de sensores remotos requiere comprender el comportamiento espectral de las coberturas en cada una de las escenas, por lo tanto, es necesario realizar las conversiones de los ND a valores biofísicos que permitan la comparación de las coberturas, de acuerdo con las características de cada producto.

La tasa de deforestación obtenida durante los periodos de análisis se relaciona con la tendencia nacional de conversión de las coberturas boscosas a otro tipo de coberturas, es necesario señalar que en esta investigación la deforestación fue definida como la transformación de los bosques a otras coberturas, por lo que las ganancias obtenidas requieren una mayor evaluación, con respecto a la definición de unidades boscosas.

El método de ACP permite estimar las unidades de bosque a nivel de pixel, dado que reduce la información redundante entre las bandas y hace posible la discriminación de la cobertura en una unidad. Para esta investigación se consideró que los resultados obtenidos permiten diagnosticar la evolución de los bosques a nivel de unidades pequeñas, diferencia a las unidades mínimas consideradas en otras metodologías, como es el caso de la interpretación visual.

9. BIBLIOGRAFÍA

ARIZA, Alexander. Descripción y Corrección de Productos Landsat 8 LDCM (Landsat Data Continuity Mission) Versión 1.0. [en línea]. INSTITUTO GEOGRÁFICO AGUSTÍN CODAZZI Bogotá.. 2013. 45p. [consulta: 26/06/2016]. Disponible en: <http://www.un-spider.org/sites/default/files/LDCM-L8.R1.pdf>.

CABRERA, Ederson; VARGAS Diana. M.; GALINDO Gustavo; GARCÍA, M^a. Claudia.; ORDOÑEZ, M^a Fernanda., Vergara, L.K., Pacheco, A.M., Rubiano, J.C. y Giraldo, P. Memoria técnica de la cuantificación de la deforestación histórica nacional – escalas gruesa y fina. Bogotá D.C. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales -IDEAM-. 2011. 106 p. ISBN. 978-958-8067-46-9

CASANOVA, Jose Luis; SALVADOR, Pablo; SANZ, Julia; RODRIGUEZ, Javier. Caracterización de BDRF Mediante un Espectrómetro ASD y un Goniómetro Electrónico. En: XV Congreso de la Asociación Española de Teledetección INTA, Teledetección Sistemas Operacionales de Observación de la Tierra. Torrejón de Ardoz (Madrid). 22-24 octubre, 2013.

COLDITZ, René R. Time Series Generation and Classification of MODIS Data for Land Cover Mapping. Thesis Dissertation. Würzburg, September 2007. [consulta: 26/06/2016]. Disponible en: https://opus.bibliothek.uni-wuerzburg.de/frontdoor/deliver/index/docId/2221/file/Dissertation_Colditz_neu.pdf

CHUVIECO SALINERO, Emilio., & Chuvieco, E. Teledetección ambiental. Ariel Ciencia 586. Madrid. 2008. 344p.

DI GREGORIO, Antonio, Sistema de Clasificación de la Cobertura de la Tierra Conceptos de Clasificación y manual para el usuario. [en línea] Food and Agriculture Organization of the United Nations FAO. Roma. (2005). [consulta: 22/06/2016]. Disponible en: http://www.glcn.org/downs/pub/docs/manuals/lccs/LCCS2-manual_270208_es.pdf

FAO. Departamento de Montes. FRA 2000 Causas y Tendencias de la Deforestación en América Latina. Roma, 2001. [en línea] Food and Agriculture Organization of the United Nations FAO. [consulta: 01/06/2016]. Disponible en: <http://www.fao.org/docrep/007/ad680s/ad680s00.htm>

FIELD, Christopher B. RANDERSON, James T. MALMSTRÖM Carolyn M. Global net primary production: combining ecology and remote sensing. Remote Sensing of Environment 1995. 51:74-88. [en línea]. [consulta: 30/07/2016]. Disponible en: <http://www.ess.uci.edu/researchgrp/sites/default/files/jranders/files/1995rsefieldetal.pdf>

FLAMENCO, A. Evaluaciones de la deforestación en México. Seminario de Aplicaciones del sistema MODIS para el monitoreo del territorio. Junio del 2009.

GALINDO G., ESPEJO O. J., RUBIANO J. C., VERGARA L. K., CABRERA E., Protocolo de procesamiento digital de imágenes para la cuantificación de la deforestación en Colombia. V 2.0. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM. 2014. Bogotá D.C., Colombia.

GOMEZ G, Iván D. POSADA, Elena. Análisis Geográficos: Tecnologías Geoespaciales al Servicio del Desarrollo Territorial. [en línea]. IGAC. Bogotá. No 49. 2011. [consulta: 1/07/2016]. Disponible en: <http://docslide.us/documents/tecnologias-geoespaciales-al-servicio-del-desarrollo-territoria.html>

IDEAM. COBERTURAS DE LA TIERRA. [en línea]. IDEAM. 2016. [consulta: 03/05/2016]. Disponible en: <http://www.ideam.gov.co/web/ecosistemas/coberturas-tierra>. Citar página del IDEAM.

INSTITUTO GEOGRÁFICO AGUSTÍN CODAZZI. Centro de Investigación y Desarrollo CIAF. Grupo de Grupo Interno de Trabajo en Percepción Remota y Aplicaciones Geográficas. Descripción y Corrección de Productos Landsat 8 LDCM (Landsat Data Continuity Mission). [en línea]. Editado por Alexander Ariza. IGAC Bogotá. 2013. [consulta: 13/06/2016]. Disponible en: <http://www.un-spider.org/sites/default/files/LDCM-L8.R1.pdf>

JANSEN, Louisa J.M. DI GREGORIO, Antonio. Parametric land cover and land-use classifications as tools for environmental change detection. [en línea]. 2000. [consulta: 12/06/2016]. Disponible en: ftp://131.252.97.79/Transfer/ES_Pubs/ESVal/LULC/jansen_lulc-classification_2002_agecoenv_v91_p89.pdf

OLAYA, Víctor. 2009. “Sistemas de información geográfica”. [en línea] Cuadernos internacionales de tecnología para el desarrollo humano núm. 8: 15p. [consulta: 12/06/2016]. Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=3113707>

RAUTNER, M., LEGGETT, M., DAVIS, F. El Pequeño Libro de las Grandes Causas de la Deforestación, Programa Global Canopy: [en línea] Oxford. 2013. [consulta: 12/06/2016]. Disponible en: http://forest500.org/sites/default/files/the_little_book_of_big_deforestation_drivers_-_spanish.pdf

SOKAL, R.. Classification: purposes, principles, progress, prospects. Science, 1974185(4157): 111–123

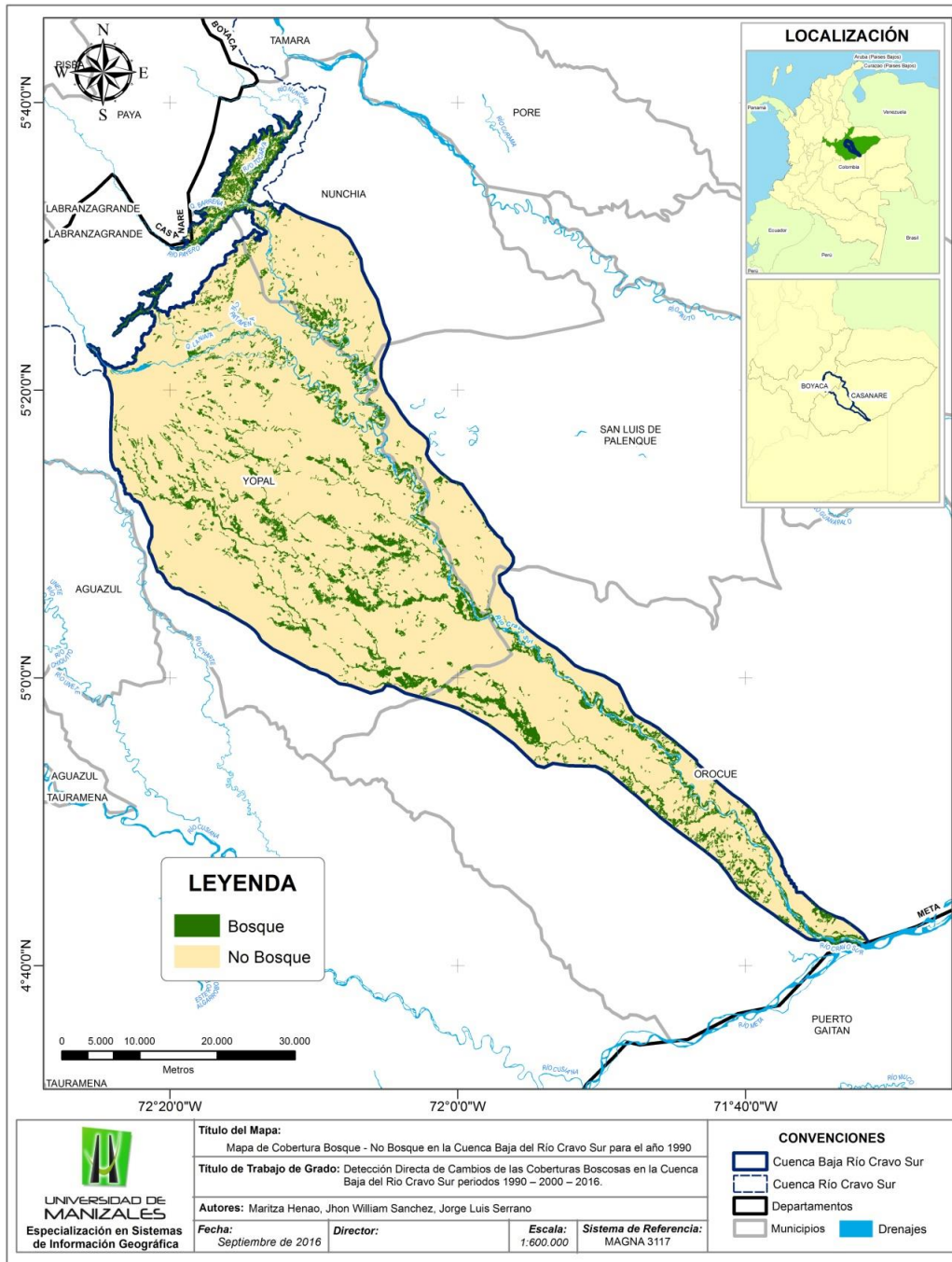
UNITED STATE GEOLOGICAL SURVEY (USGS). U.S. Department of the Interior. Using the USGS Landsat 8 Product. [en línea] USGS. 2016. [consulta: 19/05/2016]. Disponible en: <http://landsat.usgs.gov>. Page Contact Information: Ask Landsat. 9/07/16

VERBESSELT, J., HYNDMAN, R., ZEILEIS, A. & CULVENOR, D. Phenological change detection while accounting for abrupt and gradual trends in satellite image time series. Remote Sensing Of Environment . 2010.

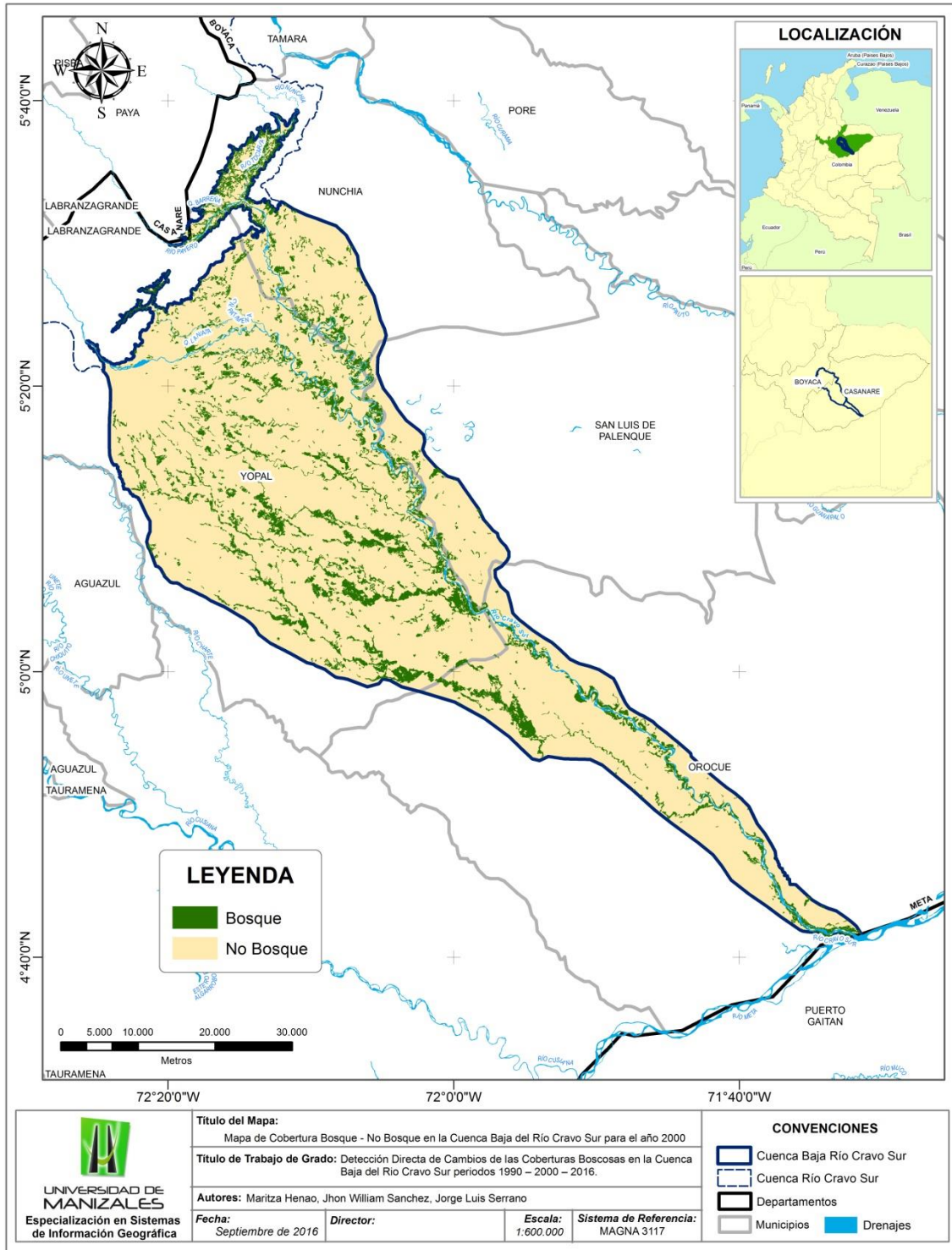
WILCOVE, D.S., MCLELLAN. C.H. and DONBSON A.P. CONSERVATION BIOLOGY . The Science of Scarsity and Diversity. Edited by Michael E. Soulé. [en línea] School of Resouerces of Michigan. 1986. [consulta: 19/05/2016]. Disponible en:https://www.fws.gov/southwest/es/documents/R2ES/LitCited/LPC_2012/Wilcove_et_al_1986.pdf

ANEXOS

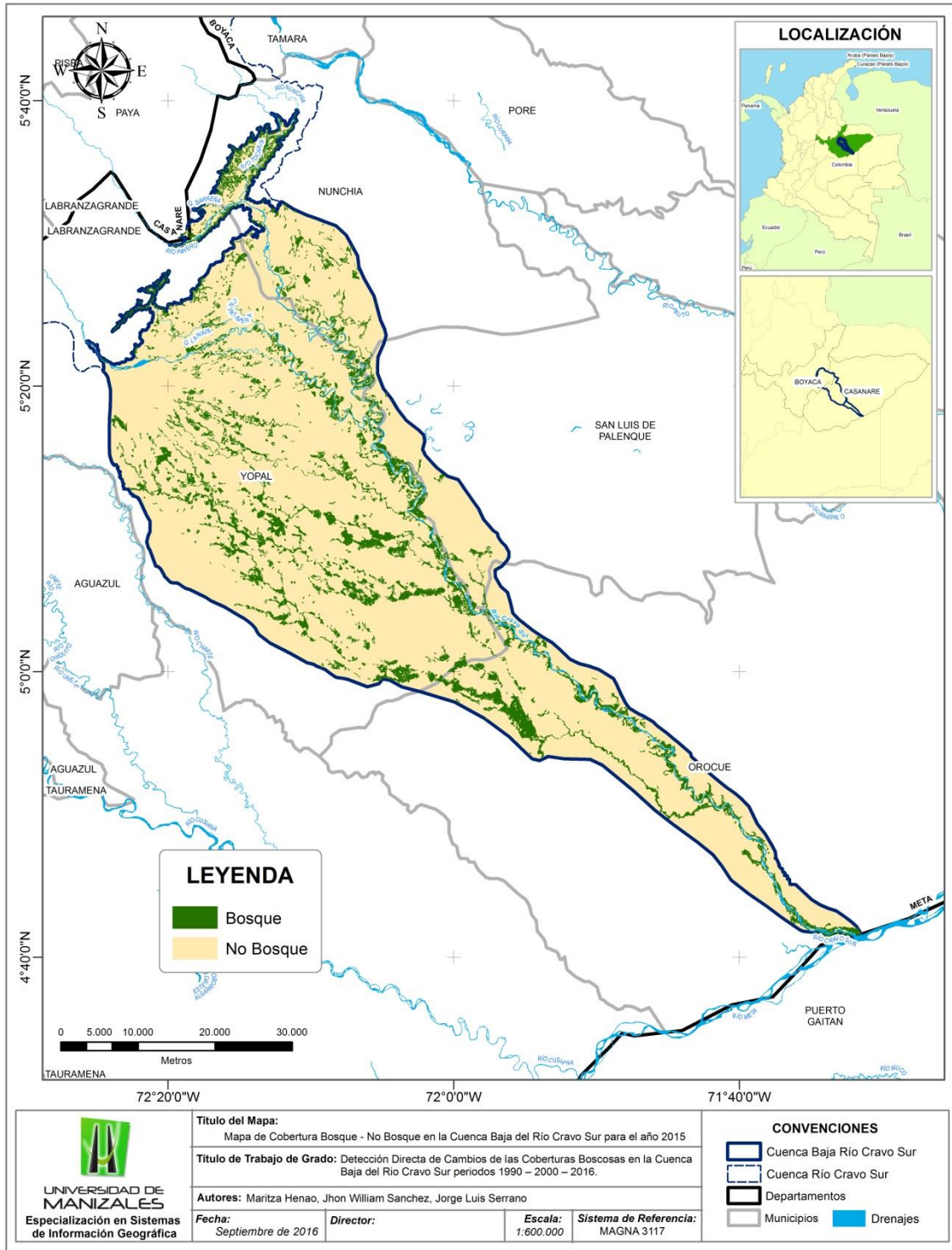
Anexo A. Cobertura de Bosque en la Parte Baja de la Cuenca del Río Cravo Sur, Año 1990.



Anexo B. Cobertura de Bosque en la Parte Baja de la Cuenca del Río Cravo Sur, Año 2000.

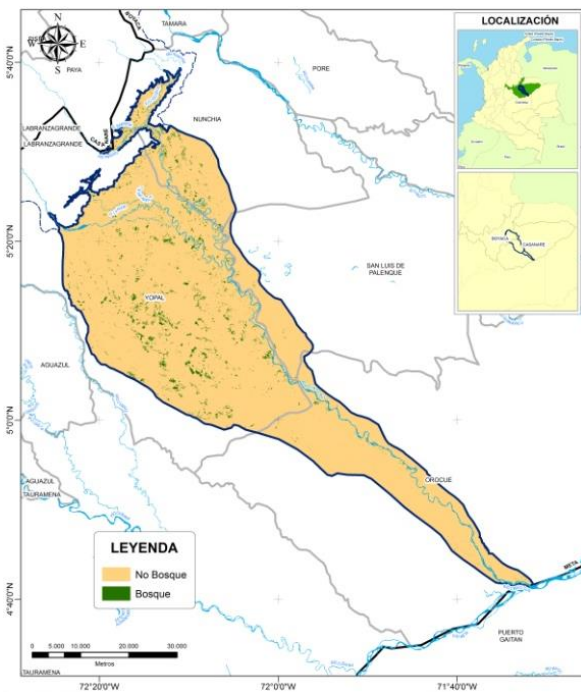


Anexo C. Cobertura de Bosque en la Parte Baja de la Cuenca del Río Cravo Sur, Año 2015.

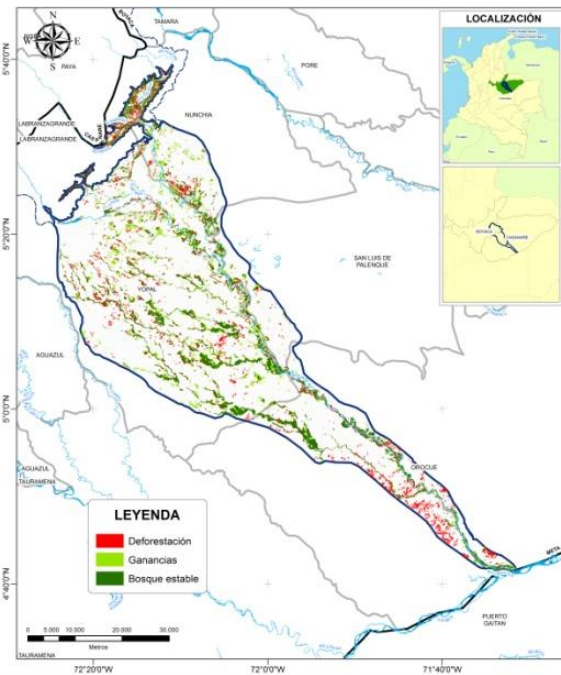


Anexo D. Comparación de Resultados de Cambios Coberturas para la Cuenca del Río Crawo Sur.

Mapa Hansen 2000 a 2012



Mapa 1990 a 2000



Mapa 2000 a 2016

