

**CAMBIOS DE COBERTURA EN EL ÁREA URBANA, ÁREA DE EXPANSIÓN  
Y CORREDORES METROPOLITANOS DE LA ZONA SUR Y NORTE DE  
SANTIAGO DE CALI - AÑOS 1984, 2000 Y 2015**

**OSCAR EDUARDO SÁNCHEZ HERVAS**



**UNIVERSIDAD DE MANIZALES  
FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA  
ESPECIALIZACIÓN EN SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA  
MANIZALES  
2018**

**CAMBIOS DE COBERTURA EN EL ÁREA URBANA, ÁREA DE EXPANSIÓN  
Y CORREDORES METROPOLITANOS DE LA ZONA SUR Y NORTE DE  
SANTIAGO DE CALI - AÑOS 1984, 2000 Y 2015**

**OSCAR EDUARDO SÁNCHEZ HERVAS**

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

**UNIVERSIDAD DE MANIZALES  
FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA  
ESPECIALIZACIÓN EN SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA  
MANIZALES  
2018**

## CONTENIDO

<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	5
<b>LISTA DE TABLAS</b> .....	6
<b>LISTA DE CUADROS</b> .....	7
<b>LISTA DE MAPAS</b> .....	8
<b>RESUMEN</b> .....	9
<b>ABSTRACT</b> .....	10
<b>GLOSARIO</b> .....	11
<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	12
<b>1. ÁREA PROBLEMÁTICA</b> .....	14
<b>2. OBJETIVOS</b> .....	15
<b>2.1 OBJETIVO GENERAL</b> .....	15
<b>2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS</b> .....	15
<b>3. JUSTIFICACIÓN</b> .....	16
<b>4. MARCO CONCEPTUAL</b> .....	17
<b>4.1 El proceso de urbanización</b> .....	17
<b>4.2 Cobertura y uso del suelo</b> .....	20
<b>4.3 Sistemas de información geográfica</b> .....	21
<b>4.4 Técnicas de análisis mediante Teledetección</b> .....	22
<b>4.5 Procesamiento de Imágenes Digitales</b> .....	23
<b>4.6 Análisis Multitemporal</b> .....	24
<b>4.7 ANTECEDENTES</b> .....	25
<b>4.7.1 Análisis multitemporal mediante sensores remotos de cobertura de la tierra para el periodo de tiempo 1999 - 2011 en el municipio de San Jacinto, Bolívar</b> .....	26
<b>4.7.2 Análisis multitemporal en la cobertura boscosa de la zona norte del departamento del Chocó, 1990 – 2014</b> .....	27
<b>4.7.3 Análisis Multitemporal del Crecimiento Urbano de Pasto Entre 1.989 y 2.014 Usando SIG</b> .....	28
<b>4.7.4 Análisis Espacial y Multitemporal de la Cobertura y Uso del Suelo con base en imágenes de Satélites en la Subcuenca Río Dipilto, Nueva Segovia, Nicaragua</b> .....	29
<b>4.7.5 Análisis multitemporal del crecimiento urbano de la zona de expansión para el periodo de 1987 – 2015 en el municipio de Ibagué, Tolima</b> .....	30
<b>5. METODOLOGÍA</b> .....	31
<b>5.1 TIPO DE TRABAJO</b> .....	31

<b>5.2</b>	<b>ÁREA DE ESTUDIO</b>	<b>33</b>
<b>5.3</b>	<b>SELECCIÓN DE LAS IMÁGENES</b>	<b>35</b>
<b>5.4</b>	<b>Pre-pocesamiento de las imágenes satelitales</b>	<b>36</b>
5.4.1	Corrección Geométrica	37
5.4.2	Corrección radiométrica de las imágenes	38
5.4.2	Corrección atmosférica de las imágenes	40
<b>5.5</b>	<b>Etapa de clasificación de las imágenes satelitales</b>	<b>43</b>
<b>5.5.1</b>	<b>Metodo no supervisado</b>	<b>44</b>
<b>5.5.2</b>	<b>Metodo supervisado</b>	<b>46</b>
5.5.2.1	Selección de las Áreas de entrenamiento	46
5.5.2.2	Algoritmo de Clasificación de las imágenes	47
<b>5.6</b>	<b>Variabilidad de las coberturas</b>	<b>55</b>
<b>5.7</b>	<b>Construcción de una base de almacenamiento</b>	<b>56</b>
<b>6.</b>	<b>Análisis de los resultados</b>	<b>59</b>
6.1	Hallazgos clasificación año 1984	59
6.2	Hallazgos clasificación año 2000	60
6.3	Hallazgos clasificación año 2015	61
6.4	Estimación de los cambios de cobertura años 1984 - 2000	62
6.5	Estimación de los cambios de cobertura años 2000 - 2015	65
6.6	Estimación de los cambios de cobertura años 1984 -2015	68
	Cambio Global periodo analizado	70
<b>7.</b>	<b>CONCLUSIONES</b>	<b>72</b>
<b>8.</b>	<b>RECOMENDACIONES</b>	<b>74</b>
<b>9.</b>	<b>ANEXOS</b>	<b>76</b>
9.1	Metadatos imagen 1984	76
9.2	Metadatos imagen año 2000	80
9.3	Metadatos imagen año 2015	84
9.4	Índice de separabilidad 1984	88
9.5	Índice de separabilidad 2000	90
9.6	Índice de separabilidad 2015	91
	<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>94</b>

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> Vista del Portal GloVis .....	35
<b>Figura 2</b> Imágenes originales.....	37
<b>Figura 3</b> Imagen Georreferenciada.....	38
<b>Figura 4</b> Contraste con información de referencia .....	38
<b>Figura 5</b> Parámetros metadatos espectrales de las imágenes años 1984 y 2000.....	39
<b>Figura 6</b> Parámetros metadatos espectrales de la imagen año 2015.....	39
<b>Figura 7</b> Apariencia preprocesamiento imagen año 1984 .....	41
<b>Figura 8</b> Apariencia preprocesamiento imagen año 2000 .....	42
<b>Figura 9</b> Apariencia preprocesamiento imagen año 2015 .....	42
<b>Figura 10</b> Algoritmo de Clasificación No supervisada.....	45
<b>Figura 11</b> Resultado Clasificación No Supervisada .....	45
<b>Figura 12</b> Selección de las áreas de entrenamiento, Imagen 2015. ....	47
<b>Figura 13</b> Índice de separabilidad.....	49
<b>Figura 14</b> Clasificación supervisada 2015 .....	49
<b>Figura 15</b> Comparación de Clasificaciones .....	50
<b>Figura 16</b> Matriz de confusión clasificación 2015.....	51
<b>Figura 17</b> Matriz de confusión clasificación 2000.....	52
<b>Figura 18</b> Matriz de confusión clasificación 2015.....	52
<b>Figura 19</b> Comparación imagen clasificada y post-clasificado con filtro. Año 2015 .....	53
<b>Figura 20</b> Comparación imagen clasificada y post-clasificado con filtro. Año 2000 .....	53
<b>Figura 21</b> Comparación imagen clasificada y post-clasificado con filtro. Año 1984 .....	54
<b>Figura 22</b> Recorte del Área de estudio, año 2015.....	54
<b>Figura 23</b> Creación de la Geodatabase .....	57
<b>Figura 24</b> Creando función de topología.....	57
<b>Figura 25</b> Reglas Topológicas .....	58
<b>Figura 26</b> Validación de topología ArcMap .....	58

## LISTA DE TABLAS

<b>Tabla 1</b> Esquema Matriz de tabulación cruzada.....	55
<b>Tabla 2</b> Matriz de Transición de clasificación de coberturas años 1984 y 2000, Valores en Hectáreas .....	63
<b>Tabla 3</b> Resumen matriz de transición años 1984 y 2000 – Valores en hectáreas.....	64
<b>Tabla 4</b> Matriz de Transición de clasificación de coberturas años 2000 y 2015, Valores en Hectáreas .....	66
<b>Tabla 5</b> Resumen matriz de transición años 2000 y 2015 - Valores en hectáreas .....	66
<b>Tabla 6</b> Matriz de Transición de clasificación de coberturas años 1984 y 2015, Valores en Hectáreas .....	68
<b>Tabla 7</b> Resumen matriz de transición años 1984 y 2015- Valores en hectáreas .....	69

## LISTA DE CUADROS

<b>Cuadro 1</b> Sistemas de clasificación de cobertura del suelo .....	21
<b>Cuadro 2</b> Diagrama Metodológico .....	33
<b>Cuadro 3</b> Propiedades de las imágenes .....	36

## LISTA DE MAPAS

<b>Mapa 1</b> Localización del área de estudio .....	34
<b>Mapa 2</b> Clasificación de cobertura año 1984 .....	60
<b>Mapa 3</b> Clasificación de cobertura año 2000 .....	61
<b>Mapa 4</b> Clasificación de cobertura año 2015 .....	62
<b>Mapa 5</b> Estabilidad y cambios de cobertura periodo 1984 - 2000 .....	64
<b>Mapa 6</b> Dinámica cobertura periodo 1984 – 2000 (transiciones).....	65
<b>Mapa 7</b> Estabilidad y cambios de cobertura periodo 2000 - 2015 .....	67
<b>Mapa 8</b> Dinámica cobertura periodo 2000 – 2015 (transiciones).....	67
<b>Mapa 9</b> Estabilidad y cambios de cobertura periodo 1984 - 2015 .....	69
<b>Mapa 10</b> Dinámica cobertura periodo 1984 - 2015 (transiciones).....	70
<b>Mapa 11</b> Cambio Global de Coberturas Período 1984 - 2015.....	71



## RESUMEN

El acelerado crecimiento urbano en el municipio de Santiago de Cali ha estado ligada a su localización estratégica sostenida sobre un eje económico de dominio comercial e industrial, los movimientos migratorios de población desplazada y la oferta de servicios, lo que genera la expansión del mercado de suelo. Estas situaciones involucran un alto dinamismo no solo al interior del perímetro urbano sino en su área metropolitana generando transformaciones en el territorio reflejado en los cambios de uso del suelo en el perímetro urbano, la zona de expansión y los corredores metropolitanos de la zona Norte y Sur.

Por esta razón mediante este estudio a partir de un análisis multitemporal se profundiza sobre el crecimiento urbano en el municipio de Santiago de Cali, basado en la comparación de imágenes satelitales Landsat para los años 1984, 2000 y 2015, mediante un proceso de clasificación supervisada con el uso del software ENVI 5.3 y ArcGIS 10.5, con el fin de cuantificar estadísticamente los cambios acontecidos e identificar patrones de crecimiento de la zona urbana y determinar el área de crecimiento urbano que se ha desarrollado en este periodo.

Los resultados permiten establecer que la dinámica en los cambios de usos del suelo y la ocupación en el área de estudio está determinada en gran medida por las transiciones de otras coberturas a suelo urbano, al tomar los valores de área del periodo 1984 – 2000, la cobertura urbana pasa de 5814.55 ha en 1984 a 9129.37 ha en el 2000, lo que se traduce en una tasa de crecimiento anual de 2,85%, en el periodo 2000 - 2015 ha la tasa de crecimiento experimenta una disminución con respecto al periodo anterior, con un valor de crecimiento del 1,13% anual, que se traducen en 10818,09 ha de área urbana en el año 2015.

**Palabras clave:** Cambios de cobertura, corredor metropolitano, zona de expansión, expansión urbana, clasificación supervisada, análisis multitemporal.

## ABSTRACT

The accelerated urban growth in the municipality of Santiago de Cali has been linked to its strategic location on an industrial-economic axis, the migratory movements of the displaced population and the supply of services, which generates the expansion of the land market. These situations involve a high dynamism not only within the urban perimeter but in its metropolitan area generating changes in the territory reflected in the use of land in the urban perimeter, the expansion zone and the metropolitan corridors of the North and South.

For this reason, through this study based on a multitemporal analysis, urban growth in the municipality of Santiago de Cali is deepened, based on the comparison of Landsat satellite images for the years 1984, 2000 and 2015, through a supervised classification process with the use of software ENVI 5.3 and ArcGIS 10.5, in order to statistically quantify the changes that have taken place and identify growth patterns of the urban area and determine the area of urban growth that has developed in this period.

The results allow to establish that the dynamics in the changes of land uses and occupation in the study area are determined to a large extent by the transitions of other coverages to urban land, when taking the area values of the period 1984 - 2000, the urban coverage goes from 5814.55 ha in 1984 to 9129.37 ha in 2000, which translates into an annual growth rate of 2.85%, in the period 2000 - 2015 has the growth rate experienced a decrease with respect to the previous period , with a growth value of 1.13% per year, which translates into 10818.09 ha of urban area in 2015.

**Keywords:** Coverage changes, metropolitan corridor, expansion zone, urban expansion, supervised classification, multitemporal analysis.

## GLOSARIO

**Expansión urbana:** Es el crecimiento geográfico de una ciudad, en el que el área urbana empieza a invadir o mezclar los usos del suelo con área rural, su población se incrementa debido al desarrollo económico, aumenta la construcción de viviendas y edificaciones para empresas e industrias hacia la periferia.

**Análisis Multitemporal:** Análisis de tipo espacial que se realiza mediante la comparación de las de coberturas interpretadas en dos imágenes de satélite o mapas de un mismo lugar en diferentes fechas y permite evaluar los cambios en la situación de las coberturas que han sido clasificadas.

**Zona de expansión:** Porción del territorio municipal destinada para uso urbano, el cual está sujeto a la norma que lo habilitará durante la vigencia del Plan de Ordenamiento. Este territorio sólo podrá incorporarse al perímetro urbano, mediante planes parciales.

**Imagen satelital:** como la representación visual de la información capturada por un sensor montado en un satélite. Estos sensores recogen la información reflejada por la superficie de la Tierra que luego es enviada de regreso a ésta y es procesada convenientemente. Las imágenes de satélite son archivos raster, formadas por una matriz regular o rejilla de celdas, a cada una de las cuales, denominada píxel (Picture Element), a los que se les asigna un valor digital, que corresponde a la reflectividad recogida por el sensor.

**Número digital:** Valor numérico, por ejemplo entre 0 y 255, que se asigna a cada posición espacial de cuadrícula en el archivo que representa los niveles digitales de brillo de una imagen.

**Clasificación supervisada:** clasificación digital de imágenes satelitales consiste en un método estadístico por el cual, a través de un muestreo de píxeles, se agrupa en categorías o clases al resto de los píxeles de una imagen. La clasificación supervisada parte de un conocimiento previo de la zona de estudio adquirida por experiencias previas o trabajo de campo, esto permite definir las categorías en las cuales se quiere separar la imagen así como la selección de las áreas de entrenamiento.

## INTRODUCCIÓN

Actualmente es creciente el discurso así como el desarrollo de estudios orientados a analizar las dinámicas de ocupación del suelo en el territorio desde diversas acepciones; planificación urbana, catastro, agricultura, gestión del riesgo, estudios ambientales y de recursos naturales son algunas de los temas. En Colombia, desde la Constitución Política<sup>1</sup> de 1991 es latente la preocupación por el uso del suelo, es así como desde ese momento se han venido formulando políticas públicas para la ordenación del territorio, en este ámbito la más importante es la ley 388 de 1997<sup>2</sup> en la que se establecen normas para el ordenamiento territorial municipal. En tal sentido, los procesos de expansión urbana y de funcionalidad que han generado diversas dinámicas de interdependencia a diferentes han debido ser contempladas en la formulación tanto del plan de ordenamiento territorial y demás herramientas de planificación para Santiago de Cali y su área de influencia.

Santiago de Cali es un referente del acelerado proceso de expansión urbana experimentado en Colombia que se refleja en la evolución y transformación del sistema urbano cuyas fronteras tienden a ser altamente dinámicas y cambiantes espacial y temporalmente. Además de los procesos de orden económico desde sostenidos por la funcionalidad espacial y localización estratégica, Cali ha tenido que afrontar la recepción de población desplazada por el conflicto armado, situación que los deja el alta vulnerabilidad por verse en la obligación de instalarse en asentamientos subnormales en zonas de alto riesgo por la afectación de fenómenos de remoción en masa en zonas de ladera e inundación asociados a la rivera del Río Cauca y Cali.

Asumiendo lo anterior, y en conformidad con este trabajo, el presente análisis de cambios de uso del suelo se concibe como un medio para estimar y monitorear el cambio de cobertura urbana entre los periodos de tiempo de 1984, 2000 y 2015 aplicado al perímetro urbano, la zona de expansión y los corredores metropolitanos de la zona sur y norte del municipio de Santiago de Cali, con ello se busca evaluar los cambios de cobertura e identificar las tendencias de ocupación en el territorio generando puntos de vista sobre la incidencia de las dinámicas y los procesos sociales que se manifiestan espacialmente. De manera transversal, se trata de generar referentes cartográficos que se conviertan en insumo básico para la toma de decisiones en cuanto a la gestión y planificación del territorio enfocándose en el diseño y puesta en marcha de políticas y proyectos sostenibles.

El diseño metodológico de este análisis se basó en la aplicación de conceptos y técnicas de percepción remota, de gran utilidad en la gestión para el análisis de las variables espacio-temporales como elementos de transformación del territorio, así como fuente de información actualizada. Para ello se partió del uso

---

<sup>1</sup> Artículos 79, 80 y 82

<sup>2</sup> Artículos 8, 31, 32 y 34

de imágenes satelitales Landsat, y su posterior procesamiento digital mediante los Software de sistemas de información geográfica ENVI 5.3 y ArcGIS 10.5, con los cuales se realizó la respectiva clasificación por cobertura y el contraste de los valores obtenidos entre las imágenes de cada año.

## 1. ÁREA PROBLEMÁTICA

El municipio de Santiago de Cali es el principal polo de desarrollo del suroccidente del país, gracias a su localización estratégica conforma un complejo urbano con los municipios de Yumbo, Palmira, Jamundí y Candelaria, así como con algunos municipios del Norte del Cauca. A su vez, la proximidad al puerto de Buenaventura en el Pacífico colombiano y la calidad agrológica de los suelos de su entorno regional ofrecen ventajas competitivas. La primera le permitió erigirse como un nodo logístico, soportado en importantes desarrollos de las infraestructuras de carreteras, ferrovías, centrales de carga, zonas francas y el aeropuerto internacional. La segunda, posibilitó el surgimiento y la consolidación de la agroindustria de la caña de azúcar, gracias a las grandes extensiones de un valle fértil (Martínez Toro & Buitrago, 2011). No obstante, el reconocimiento de Cali como un centro urbano jerarquizado que ejerce influencia más allá de sus límites políticos administrativos no es el resultado de un proceso de metropolización planificado adelantado desde la década de 1960, sí bien ha sido un tema contemplado en el discurso político desde la época, no se ha llegado a retomar dentro de un marco normativo.

Consecuencia de la metropolización, Cali ha experimentado un acelerado proceso de urbanización, enfrentando desde hace varias décadas un problema recepción de población desplazada que se ve reflejado en el emplazamiento de asentamientos subnormales en diferentes zonas del área urbana. Esta situación genera exigencias en términos de acciones de ordenamiento territorial, dando lugar a tensiones por el acceso a la vivienda, los servicios públicos y la localización de estos asentamientos en zonas de riesgo y de afectación ambiental.

Tomando en consideración lo anterior, y conociendo estas situaciones como algunas de las causas de la acelerada urbanización que se manifiestan dentro de un proceso de metropolización que consolidada a Cali como ciudad-región, siendo esta una de las actividades humanas que más impactos tienen sobre el ambiente local, es importante estimar las posibles tensiones generados por el uso del suelo urbanizado y las coberturas previas a este uso. Por lo tanto, ante la carencia de información que analice la extensión y distribución de las clases de ocupación del suelo, y los cambios acontecidos en el área construida de la ciudad, se pretende construir información cuantitativa mediante herramientas de percepción remota que describan la distribución de las áreas construidas y no construidas de la ciudad y sus corredores metropolitanos, así como saber dónde, cuándo y en qué magnitud ocurren los cambios de ocupación del suelo, de manera que dicha información pueda ser utilizada para la toma de decisiones conforme a la norma establecida en el Plan de Ordenamiento Territorial vigente y los instrumentos de planificación.

Así, este estudio pretende abordar el territorio a ser ocupado por los nuevos desarrollos urbanos vinculados a Cali, ya sean producto de la expansión planificada en las zonas dispuestas conforme a la norma o por desarrollos espontáneos o subnormales conforme a las dinámicas territoriales.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1 OBJETIVO GENERAL**

Establecer el crecimiento del área urbana de la ciudad de Santiago de Cali, a partir de la dinámica espacial y temporal en los cambios de cobertura en el perímetro urbano, la zona expansión y los corredores metropolitanos de la zona Norte y Sur de la ciudad entre los años 1984 y 2015 mediante la aplicación de herramientas de sistemas de información geográfica.

### **2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Construir una base cartográfica de acuerdo a las técnicas establecidas en teledetección para las clasificaciones de cobertura del suelo en el perímetro urbano, la zona de expansión y los corredores norte y sur de la ciudad de Cali, conforme al proceso de urbanización.
- Describir los cambios en la cobertura del suelo en el periodo de tiempo de estudio.
- Identificar y caracterizar la dinámica en los procesos de cambio de uso del suelo.

### 3. JUSTIFICACIÓN

La ocupación del territorio está determinado ampliamente por una carga histórica de relaciones dinámicas y complejas en la que convergen factores económicos, sociales, culturales, ambientales y político-institucionales. En Colombia se pueden evidenciar las transformaciones territoriales que han acelerado el crecimiento urbano producto de diversos factores, tales como lo es el crecimiento aún acelerado de la población, desplazamiento de las personas del campo a la ciudad, procesos de metropolización, disminución de participación del sector agrícola en la economía nacional.

El proceso de urbanización experimentado en Cali no es ajeno al del resto de las grandes ciudades del país, por ello se hace imperativo conocer la configuración actual de ocupación del suelo desde las normas de Uso fijadas en el Plan de Ordenamiento Territorial y desde el plano ambiental. Aún más cuando Cali afronta problemas de disponibilidad de suelo para programas de vivienda y es receptora en su territorio de población desplazada a causa del conflicto armado vivido principalmente en las zonas rurales, población que se ve en la obligación de ubicarse en asentamientos al margen de la planificación urbana generando patrones de ocupación del suelo por fuera de la norma. Por lo tanto, los resultados cartográficos que resulten de este estudio son necesarios como insumo base en la ordenación y planificación sostenible del territorio, tras dimensionar y caracterizar estas lógicas espaciales que se manifiestan al interior de la ciudad y que superan sus límites urbanos.

Así la discusión de la transformación urbana en el periodo de 30 años, bajo tres momentos, siendo los años 1984, 2000 y 2015, se centra principalmente en analizar la dinámica espacio-temporal en los corredores metropolitanos del Norte y Sur la Ciudad e identificar las tendencias de ocupación del suelo que sirvan de insumo para la planificación sostenible del territorio, si bien Cali no tiene jurisdicción sobre estos municipios, es por su influencia que configura sobre estas zonas una realidad de sí misma extendida hacia otros municipios.

Debe reconocerse que desde la administración municipal, a partir de las herramientas de gestión consignadas en el POT, mediante los tratamientos urbanísticos y el desarrollo de planes parciales contemplan estrategias para el cambio en el patrón de ocupación, a partir de la densificación regulada y renovación urbana para la reactivación de sectores de la ciudad que ayuden a superar la falta de opciones para la expansión del suelo urbano, es un hecho que el proceso de urbanización que deriva en la conurbación no se detiene, al punto de desbordar la disposición del suelo sobre el corredor Cali-Jamundí, único suelo de expansión establecido en el POT de la ciudad. No obstante, aunque se tiene en cuenta otras áreas como futuras áreas de expansión, quedaron sujetas a la condición suspensiva, es decir, de la realización de estudios y labores que permitan la urbanización y que demuestren la mitigación de los riesgos enunciados por la CVC (DAPM, 2000).



De acuerdo con lo anterior, y bajo el marco de espacio y tiempo para la ocupación del suelo urbano, enfocado en el ámbito de transformación y distribución de las áreas construidas, se convierte en una necesidad imperativa para los procesos de planificación conocer las tendencias de los procesos de ocupación ya sea desde las áreas dispuestas para tal fin o de los espacios por fuera del límite de la ciudad.

## **4. MARCO CONCEPTUAL**

### **4.1 El proceso de urbanización**

Aprile-Gnisset y Mosquera (1978 citado por Sánchez Steiner, 2008) definen el término urbanización como una fase posterior a la etapa de concentración urbana provocada por la acumulación de flujos humanos, bienes, dinero y productos en un lugar centralizador; la concentración implica y exige la posterior adecuación y transformación del centro y es esa fase subsiguiente en la cual la aglomeración urbana se convierte en ciudad. Así, Aprile-Gnisset afirma que terminada la fase cuantitativa de acumulación urbana en Colombia, empezó, desde mediados de los años sesenta, la fase cualitativa de transformación y adecuación de las ciudades. En esta línea, se da lo que Aprile-Gnisset define como la colonización popular urbana, en donde las tierras que circundaban al poblado, consideradas como inconstruibles, subutilizadas y despreciadas se integran a la urbe moderna por medio de un proceso de colonización urbana popular determinado por invasiones, tomas y posesiones colectivas que funcionan de manera concertada.

Diversos autores coinciden en afirmar que la acelerada acumulación urbana que se produjo en Colombia a mediados del siglo XX tuvo que ver parcialmente con un rápido crecimiento demográfico producto de las altas tasas de fecundidad y el descenso de las tasas de mortalidad en las zonas urbanas, pero principalmente con una fuerte movilidad poblacional traducida en las migraciones internas del campo a la ciudad. Los cambios económicos, sociales y políticos desarrollados en el país desde finales del siglo XIX, relacionados con la economía cafetera, la modernización de la agricultura, del transporte y de la infraestructura de servicios, la naciente industrialización, los conflictos por tierras en el campo, la polarización política, entre otros, tuvieron que ver con los fenómenos migratorios (Sánchez Steiner, 2008). De esta manera en Colombia los fenómenos migratorios han marcado la configuración del espacio nacional e influenciado las formaciones urbanas.

De acuerdo con un estudio realizado por la Universidad Externado, en Colombia, la migración de población rural-urbana no ha cesado y en cambio ha cobrado un

nuevo impulso debido al decaimiento del sector agrario, a la pobreza rural, a la concentración de la propiedad, a la situación de violencia generada por grupos al margen de la ley y al consecuente desplazamiento forzado, muchas de cuyas corrientes provienen directamente de áreas rurales y pequeños poblados para ubicarse en las grandes ciudades (Universidad Externado, 2007). Bajo este marco, la estructura de la población cambió de manera sustancial a lo largo del tiempo, es así como se pasó de una población mayoritariamente rural en la década del 1950 en donde solo el 39% de los 11,5 millones de habitantes vivió en las zonas urbanas y como para 1993 con 37,6 millones el 68% era población urbana, cifra que continuo en aumento conforme al censo DANE para el 2005 en donde se registró una población de 41,2 de millones, de los cuales 78% reside en la zona urbana.

Una consecuencia directa del proceso de urbanización es la creciente concentración de población en ciudades de mayor tamaño y densidad. De acuerdo con Martínez Toro (2005) Cali conforma junto con Medellín la otra metrópoli regional y Bogotá la metrópoli nacional, el denominado triángulo de oro del país, ya que entre las tres metrópolis organizan la economía nacional, concentran el mayor número de población y de recursos. Más allá de las ventajas y oportunidades que genera el proceso de urbanización para la oferta de servicios y la competitividad económica, se identifican acciones que desbordan la capacidad de acción de las instancias de planificación lo que paralelamente ha conducido a que buena parte de las nuevas viviendas se hayan levantado en zonas no aptas para la construcción, ya sea porque corresponden a zonas de alto riesgo o porque ejercen presiones sobre los ecosistemas previamente existentes.

Para Santana (2009) la urbanización es una de las actividades humanas que más impactos tiene sobre el ambiente, afecta la relación escorrentía - infiltración, el intercambio de energía entre la tierra y la atmósfera, la calidad del agua y del aire, las condiciones climáticas. A su vez, la vegetación verde constituye una variable fundamental para la población por los bienes y servicios directos que le aporta, mediante su influencia en la erosión y sostenibilidad de los usos del suelo, sus efectos sobre procesos globales básicos como los ciclos biogeoquímicos y el calentamiento global y por ser la variable de mayor impacto sobre la biodiversidad. En el caso de los paisajes urbanos los beneficios de la vegetación, están dados no solo por factores estéticos, sino por su capacidad para transferir a la atmósfera, mediante la transpiración, el calor almacenado en el suelo y las estructuras urbanas.

Asociado al proceso de urbanización dentro del perímetro de la ciudad, se identifica el emplazamiento de núcleos urbanos sobre la zona Norte y Sur de la Ciudad de Cali sobre lo que se denomina corredores metropolitanos, entendidos

por Martínez (2005) como vías conectoras entre la Metrópoli y las ciudades satélites próximas sobre los cuales ocurre el fenómeno de conurbación; que refiere a la colmatación de los espacios intermedios entre la metrópoli y los satélites, normalmente este fenómeno se suscita en la categoría del espacio rural como es el suelo suburbano. Dentro de la estructura que configuran los corredores metropolitanos, el orden centro–periferia organiza las relaciones y actividades interurbanas, con intensidades espaciales o funcionales que no son propias de las zonas urbanas consolidadas.

De acuerdo con lo anterior, Cali ha venido desarrollándose mediante fenómenos inerciales de conurbación con sus municipios vecinos como consecuencia de las dinámicas económicas, del mercado y la sociedad civil. En el norte, se ha configurado una conurbación en donde la frontera urbana residencial de Cali, se conecta a través de dos ejes viales con varias zonas industriales en el área de Yumbo. En el sur de la ciudad viene avanzando a pasos acelerados un proceso de integración y conurbación con el municipio de Jamundí (DAPM, 2000). Este fenómeno de crecimiento acelerado en el que las ciudades trascienden sus límites político-administrativos hacen pertinente el diseño de una solución regional para enfrentar el problema producido por los límites de la jurisdicción de la planificación urbana que por lo general se circunscribe solo a las ciudades, pero no en términos de región, haciendo ciudades aisladas e inconexas, lo cual plantea el reto de pensar la planificación desde otra escala que este definida bajo las cabeceras municipales de Yumbo-Cali-Jamundí

Precisando el concepto de conurbación, Barrera (2015) desarrolla ampliamente esta noción, retomando a Gueddes lo define como; una agrupación de ciudades reunidas en una constelación, que conformaban aglomeraciones dispersas de núcleos urbanos pero con una marcada relación estructural en cuanto se conectaban físicamente a través de corredores funcionales de movilidad, como lo fue el ferrocarril para la revolución industrial, o funcionalmente en cuyo caso la relación de dependencia se establecía frente a polos de concentración, mercadeo y producción.

Sobre los corredores metropolitanos de la zona Norte y Sur, Barrera (2015) plantea para Cali dos procesos diferentes de conurbación de acuerdo a los patrones identificados en función de los usos y las tensiones generadas entre a los núcleos urbano. El primero denominado Patrón de Conurbación lineal – concentrada; Se caracteriza por localizarse sobre los corredores funcionales de transporte. Las aglomeraciones en este escenario de perfil industrial se caracterizan por albergar grandes funciones de almacenaje, procesamiento y fabricación que progresivamente ajustan sus estructuras en respuesta a la tecnología y a la escala, para adecuarse a la prestación de servicios industriales coherente con el modelo de acumulación flexible. Patrón de Conurbación

expansiva lineal – dispersa; se caracteriza por mostrar una amplia irrigación urbana en movimiento con un claro propósito de generar espacialidades continuas entre dos núcleos. Este patrón de conurbación se sustenta en las dinámicas expansivas de dos núcleos contiguos que construyen tejido urbano y se consolidan progresivamente de acuerdo a su aproximación. Como una característica común en las conurbaciones, la tendencia al encuentro de sus espacialidades tiene relación con un corredor funcional de transporte que permite los movimientos pendulares entre núcleos.

Estos procesos se reconocen en el POT del año 2000, en donde desde el punto de vista microregional, se habla de que en Cali se ha ido conformando una zona en la que tanto Cali como los municipios vecinos han ido adquiriendo funciones especiales. Así, Jamundí ofrece una alternativa de vivienda y posee la infraestructura relacionada con la actividad de recreación. Yumbo es epicentro del sector energético, con depósitos de combustibles, una de las zonas industriales más importantes del país, la central de carga CENCAR, el gasoducto y las termoeléctricas.

## 4.2 Cobertura y uso del suelo

Abordar las características o los atributos de la superficie terrestre conlleva tomar en cuenta dos puntos de vista diferentes, pero no excluyentes como lo son la **cobertura del suelo** y el **uso de suelo**. Para Di Gregorio (2005) la cobertura del suelo, como la cobertura (bio) física que se observa sobre la superficie de la tierra en un término amplio no solamente describe la vegetación y los elementos antrópicos existentes sobre la tierra, sino que también describen otras superficies terrestres como afloramientos rocosos y cuerpos de agua. Para el IDEAM la cobertura se traduce 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 Janssen y Di Gregorio (2000) el Uso implica la utilidad que presta un tipo de cobertura al ser humano, se relaciona con las actividades humanas o las funciones económicas de una porción específica de la Tierra (como el uso urbano o industrial, de reserva natural, etc.).

Determinar el uso actual del suelo e identificar sus principales coberturas, nos permite establecer los grados de intervención del hombre en ecosistemas de interés, cuál es su estado de conservación, además de identificar los principales conflictos socio ambientales existentes y establecer las responsabilidades sociales en el deterioro y las estrategias de ordenamiento y restauración (EOT Boavita, Boyaca, 2010). El conocimiento de la cobertura y uso del suelo es indispensable en la caracterización y espacialización de las unidades de paisaje,

permite saber cuál es el cambio, así como indicar dónde ha ocurrido, y reportar estadísticas sobre el área de pérdida y ganancia en las transiciones de cobertura de suelo.

Para efectos de este trabajo, los esfuerzos se centraron en la identificación de coberturas del suelo. A continuación se presentan algunas de las clasificaciones de cobertura más utilizadas en el mundo, cada una compromete iniciativas y proyectos de clasificación con diferentes orientaciones u objetivos, y escalas de trabajo. Es importante mencionar que para el caso de los usos del suelo, también existen complejos sistemas de clasificación.

**Cuadro 1** Sistemas de clasificación de cobertura del suelo

Servicio Geológico de los Estados Unidos (SUSG)	CORINE Land Cover CLC	Unión Geográfica Internacional (IGU)
1. Superficie urbana	1. Superficies artificiales	1. Uso urbano y relacionado
2. Tierras agrícolas	2. Áreas agrícolas	2. Vegetación natural y/o plantada
3. Tierras de pastoreo	3. Bosques y áreas seminaturales	3. Áreas agrícolas
4. Tierras forestales	4. Áreas húmedas	4. Cuerpos de agua
5. Superficies de agua	5. Cuerpos de agua	5. Tierras económicamente no productivas
6. Humedales		
7. Tierras secas		
8. Tundra		
9. Nieve y hielo perenne		

Fuente: Elaboración propia

### 4.3 Sistemas de información geográfica

El uso de herramientas tecnológicas en diferentes disciplinas, ha ayudado enormemente al desarrollo de nuevos métodos de análisis espacial, así como una mayor efectividad en la obtención, procesamiento (tratamiento) de información espacial georreferenciada. Los sistemas de información están contemplados para elevar la calidad de los de análisis y las relaciones que se construyen en el espacio.

El IGAC (2005) define los sistemas de información con el conjunto de métodos, herramientas y actividades que actúan coordinada y sistemáticamente para recolectar, almacenar, validar, manipular, integrar, analizar, actualizar, extraer y desplegar información, tanto gráfica como descriptiva de los elementos considerados, con el fin de satisfacer múltiples propósitos.

Los Sistemas de Información Geográfica constituyen una herramienta muy potente para la gestión y el análisis de la información espacial. Junto con otras

tecnologías de la información geográfica han permitido avances muy notables en la gestión eficiente de muchos problemas geográficos (mantenimiento de grandes infraestructuras, creación de catastros multipropósito, gestión del transporte, etc.) o en la ordenación del territorio y la planificación ambiental (Bosque Sendra, 2001).

#### 4.4 Técnicas de análisis mediante Teledetección

La generación de información mediante la manipulación de imágenes satelitales, está determinada por su tratamiento digital, para cual emplea herramientas de teledetección, basándose en la captura directa, y en forma digital de información a distancia.

La percepción remota o teledetección puede definirse como la ciencia de obtener información de un objeto mediante la interpretación y el análisis de los datos adquiridos a partir de sensores que no está en contacto físico con dicho objeto. Esto es posible gracias a la interacción energética entre el sensor y los objetos en la superficie, conocida como radiación electromagnética (Chuvienco Salinero, 2002).

Para Chuvienco la teledetección se compone de los siguientes elementos:

**Fuente de energía:** Emisor de energía lumínica o radiación electromagnética que llegará a la superficie terrestre y que será captada por el sensor, utilizando como fuente de energía el sol o los mismos objetos observados.

**Cubierta Terrestre:** formada por los distintos objetos que se encuentran en la superficie terrestre, y que reciben la señal energética y la reflejan o emiten de acuerdo a sus características físicas o químicas.

**Sistema sensor:** compuesto por el sensor y la plataforma que lo alberga, tiene como misión captar la energía procedente los objetos, codificarla, y grabarla o enviarla directamente al sistema de recepción.

**Sistema de recepción remota y comercialización:** recibe la información transmitida por la plataforma, la guarda, graba y distribuye, realiza correcciones y distribuye a los interesados.

**Intérprete o analista:** Es el encargado de convertir los datos en información temática de interés, a partir de la clasificación y análisis de los datos contenidos en la imagen.

**Usuario final:** es quien recibe y utiliza la información para interpretarla con fines específicos.

## 4.5 Procesamiento de Imágenes Digitales

De forma generalizada, se define a una imagen digital como un arreglo de números que representa una distribución espacial de ciertos parámetros de campos, como la reflexión de energía electromagnética, emisión, temperatura, o alguna variable de elevación topográfica o geofísica. Una imagen digital está conformada por elementos pictóricos discretos denominados píxeles organizados en filas y columnas. Cada píxel tiene asociado un número denominado como Nivel Digital (ND), el cual representa la intensidad o brillo promedio de un área mínima relativa dentro de la escena, generalmente, el rango de niveles digitales va de 0 a 255 (Posada , Manuel de prácticas de Percepción Remota, 2012).

Para Alzate (2001), el principal objetivo del procesamiento digital de imágenes es permitir manipular y analizar los datos de imágenes producidas por sensores remotos, de tal forma que sea revelada información que no puede ser reconocida inmediatamente en la forma original.

El procesamiento digital es el conjunto de métodos y técnicas orientado a manipulación y análisis cualitativo y cuantitativo de las imágenes digitales, su corrección, mejoramiento, transformación y/o clasificación temática con el fin de generar información útil sobre objetos, áreas y fenómenos, sin estar en contacto con ellos, y con el fin de mejorar conocimiento sobre los recursos naturales de la tierra y medio ambiente.

Según Chuvieco (1995), se puede describir cualquier tipo de energía radiante en función de su longitud de onda o frecuencia, y aunque sus valores son continuos, se ha logrado fijar una serie de bandas en donde la radiación electromagnética manifiesta un comportamiento similar, a esta organización de bandas se le denomina espectro electromagnético. En teledetección, las bandas espectrales que son empleadas con mayor frecuencia en la distinción de coberturas terrestres son: el Espectro visible (0,4 a 07  $\mu\text{m}$ ), el infrarrojo cercano (0,7 a 1,3  $\mu\text{m}$ ), infrarrojo medio (1,3 a 8  $\mu\text{m}$ ), infrarrojo lejano o térmico (8 a 14  $\mu\text{m}$ ) y Micro-ondas (por encima de 1 mm), las cuales permiten percibir los objetos que se encuentran sobre la superficie terrestre a través de la energía reflejada o emitida por cada elemento.

Por lo tanto, al llegar la energía electromagnética a la superficie terrestre, esta interactúa con cada tipo de material, mediante la reflexión, absorción o transmisión de acuerdo a un patrón de respuesta espectral particular determinada por la estructura y composición del objeto, siendo conocido como firma espectral. Es el comportamiento distintivo de los objetos el aprovechado en los procesos de clasificación de imágenes.

La clasificación de imágenes multi-espectrales tiene como objetivo identificar las clases o grupos espaciales con ciertas características en común. Las clases obtenidas deben tener comportamientos excluyentes, es decir que las clases deben ser espectralmente diferentes, además de disponer de un valor informativo de interés para la investigación (Romero, 2006).

Tradicionalmente, se han seguido dos enfoques en la realización de las clasificaciones: uno de tipo supervisado y otro de tipo no supervisado. El enfoque de tipo supervisado supone un entrenamiento de clasificador a través de un conocimiento a priori de la verdad terreno que se ha seleccionado como representativa de las clases de información que se quieran reconocer en la imagen. El enfoque no supervisado no precisa el conocimiento previo de una verdad terreno, y tiene la pretensión de segmentar la imagen en una serie de clases por procedimientos exclusivamente numéricos, basándose sólo en la estructura que posean los datos espectrales (Romero, 2006).

**Clasificación supervisada:** La clasificación supervisada requiere de cierto conocimiento previo del terreno y de los tipos de coberturas, a través de una combinación de trabajo de campo, análisis de fotografías aéreas, mapas e informes técnicos y referencias profesionales y locales. Con base de este conocimiento se definen y se delimitan sobre la imagen las áreas de entrenamiento o pilotos. Las características espectrales de estas áreas son utilizadas para "entrenar" un algoritmo de clasificación, el cual calcula los parámetros estadísticos de cada banda para cada sitio piloto, para luego evaluar cada ND de la imagen, compararlo y asignarlo a una respectiva clase. La clasificación supervisada pretende definir las clases temáticas que no tengan claro significado espectral, considerada por esto como un método artificial (Posada, Introducción al Procesamiento Digital, 2008).

**Clasificación no supervisada:** La clasificación no supervisada contempla los procedimientos de agrupación de los píxeles de una imagen según su similitud espectral, sin conocimiento previo del contexto temático. En este método no se requiere conocimiento de los tipos de cobertura a priori. El proceso se basa en la elección de las bandas espectrales de la imagen a clasificar, definición de número de clases espectrales, selección de los criterios de similitud y algoritmos de agrupación de los ND (Posada, Introducción al Procesamiento Digital, 2008).

#### 4.6 Análisis Multitemporal

En la aplicación de imágenes satelitales, el análisis multitemporal constituye uno de los métodos más eficaces para la comparación y determinación de cambios en la cobertura terrestre que acontecen en un lapso de tiempo, y que



generalmente se asocian a la acción del hombre sobre su entorno (Almeida, Duriavich, Napolitano, & Feoli, 2009). El análisis multitemporal se realiza a partir análisis de componentes principales de donde se estiman las correlaciones que existe en las coberturas que no sufren cambios significativos en imágenes de diferentes fechas, y de forma inversa, para aquellas coberturas que presentan cambios significativos en el tiempo, presentando una baja correlación. De esta manera el análisis de componentes principales, puede ser de utilidad para condensar la información o variabilidad espectral de un conjunto de imágenes en diferentes fechas para llevar a cabo el análisis de cambios y anomalías de coberturas (Chuvienco Salinero, 2002).

De acuerdo con Chuvienco (2002), son varias las técnicas desarrolladas que permiten observar los cambios en la cobertura terrestre, pudiéndose mencionar las composiciones de color multitemporales, la diferencia entre las imágenes; los cocientes multitemporales, los componentes principales y la regresión. Estas técnicas implican la comparación entre píxeles y los niveles digitales asignados a los niveles de radiancia para las distintas fechas, de esta manera los resultados obtenidos en las imágenes indican el grado de cambio desde la mayor pérdida hasta la mayor ganancia en una escala gradual.

Para la adecuada aplicación de técnicas de análisis multitemporal es necesario la adquisición apropiada de las imágenes originales con correspondencia espacial, así como ser sometidas a correcciones geométricas y homogenización radiométrica. Bajo esta técnica no solo se obtienen las zonas estables y dinámicas, sino además cual era la cobertura original con el fin de establecer tendencias de cambio en el área de estudio, de esta manera podría correlacionarse con información complementaria para estudiar los orígenes de dichos cambios. (Chuvienco Salinero, 2002).

#### **4.7 ANTECEDENTES**

Los sensores remotos en la actualidad se han convertido en un herramienta de gran utilidad para el análisis en distintas disciplinas gracias a su capacidad de procesar gran volumen de información durante periodos de tiempo y a grandes escalas territoriales, siendo utilizado en la evaluación de recursos naturales, evaluación de impacto ambiental, la identificación de zonas de amenaza y el seguimiento a procesos del ocupación del territorio, situaciones enmarcadas en la generación de propuestas que definan un uso adecuado del territorio para los entes administrativos. A continuación se presentan algunas experiencias en tema como marco de referencia dentro de este estudio.

#### **4.7.1 Análisis multitemporal mediante sensores remotos de cobertura de la tierra para el periodo de tiempo 1999 - 2011 en el municipio de San Jacinto, Bolívar**

Mediante este estudio Ramírez Zapata (2015) realizó un análisis e identificación de las coberturas en el Municipio de San Jacinto en el Departamento de Bolívar. En el que a partir de imágenes satelitales (Rapideye y Spot) del año 1999 y 2011, se identificaron cambios en las coberturas terrestres entre estas dos épocas a una escala 1:25000. Para la definición de las unidades de cobertura se apoyó de la leyenda CORINE Land Cover, codificando la primera versión de la interpretación y haciendo la validación de patrones de cobertura en campo y de forma sistemática para su verificación. El proceso posterior incorporo el control de calidad, donde con fotografías aéreas y registro fotográfico de la zona se completó el proceso de codificación en cada unidad.

La interpretación para el año 2011, se realizó mediante digitalización en pantalla, para lo cual se definirán patrones por las unidades más representativas para luego detallar con unidades más específicas, todo apoyado de fotografías aéreas, e imágenes disponibles de Google Earth. En la interpretación del año 2009, se realizó una clasificación supervisada, basados los puntos previos de clasificación de coberturas obtenidos en la clasificación no supervisada y con ayuda de unos puntos que fueron clasificados en base a fotografías aéreas de la misma época; esto se realizó con el fin de poder tener un apoyo más confiable para poder determinar las unidades más representativas y que estas fueran más específicas con el producto esperado.

Para determinar cambio por unidad de cobertura, se empleó un concepto de tabulación cruzada, procesando la información con IDRISI Selva. El proceso de control de calidad se realizó sobre las planchas interpretadas en formato análogo, donde se encuentre la delineación de las coberturas y los códigos de identificación respectivos, adelantando sobre este material, correcciones de unidades, recodificación y ajustes necesarios, apoyados de fotografías aéreas y la información de campo.

Con la aplicación del proceso de clasificación supervisada de coberturas y el análisis de las mismas se reflejó como principal expansión las Tierras agrícolas, asimismo, el municipio de San Jacinto presentó un cambio neto del 29.56 % de su área, donde las principales transiciones se encontraron en relación con los Bosques y Áreas Seminaturales.

#### **4.7.2 Análisis multitemporal en la cobertura boscosa de la zona norte del departamento del Chocó, 1990 – 2014**

Este estudio de Palacios (2015) consistió en el análisis multitemporal de cambios de cobertura en la región del Pacífico Norte chocoano integrada por los municipios de Nuquí, Bahía Solano y Juradó. Se cuantificó la cobertura boscosa tomando como insumos los análisis de la información de deforestación de los periodos de 1990, 2000, 2005, 2010 y 2012 suministrados por el IDEAM para toda Colombia; y para el periodo de 2014 se realizó la interpretación digital con Imágenes del Sensor RapidEye del 2014.

El análisis de la cobertura comprendió diferentes etapas y procedimientos. Para la estandarización de las variables espaciales, aplicó la referencia espacial del marco geocéntrico nacional de referencia, densificación del sistema de referencia geocéntrico para las américas, llamado MAGNA-SIRGAS.

Para la cuantificación y análisis de las coberturas, se aplicaron las siguientes técnicas. La Corrección geométrica consistió en el proceso de rectificación a través de la transformación matemática de coordenadas, desde un sistema de imagen (número de fila y columna - pixel) a un sistema de coordenadas reales del terreno. La Corrección radiométrica por su parte se define por aquellas técnicas que modifican los niveles digitales (ND) originales con el fin de acercarlos a los que habrían de estar presentes en la imagen en caso de una recepción ideal por parte del sensor del satélite.

Finalmente para la Clasificación Supervisada, se realizó la toma de “muestras” de los valores espectrales presentes en ese sitio, conocido como “entrenamiento del equipo” y sirve para que el programa busque los valores espectrales similares a los de las “semillas” en el resto de la imagen. Se tomaron muestras representativas de las coberturas existentes de la Metodología Corine Land Cover para que el sistema por medio de la clasificación supervisada generara los pixeles que cumplen con las muestras tomadas.

Los resultados obtenidos, muestran que en el área de estudio se cuantificó en cobertura de bosque 251949,52ha para el año de 1990, la cual entre la década del mismo año y el año 2000 tuvo una reducción de 19709,89ha, presentando una tasa anual de reducción de 1978,9ha. Para el periodo de 2000-2005, hubo una reducción de 61405ha, entre el año 2005 – 2010 hubo un aumento de 15209,56ha, además para el año 2012 se presentó un aumento de 10082,50ha, por último se observa que para el año 2014 este bosque presentó una disminución alarmante con 51864,70ha con respecto al año 2012, de manera que al final de periodo se cuantificaron 205252,64ha.

El autor establece que las diferencias de los porcentajes de permanencia de bosques en periodo 2010- 2012 de 97,11% al periodo 2012-2014 de 80,34%, en

primera instancia se debe a que las fuentes de información para el período 2014 siendo las Imágenes del Sensor RApiEye con tamaño de pixel 5m, dan mayor eficiencia y permite la interpretación digital a escala 1:25000, mientras que las fuentes de información para el periodo 2013-2012 tuvo información de sensores Landsat y Spot, entre otros que tiene tamaño de pixel mínimo de 30m, restituyendo a escala 1:100.000.

#### **4.7.3 Análisis Multitemporal del Crecimiento Urbano de Pasto Entre 1.989 y 2.014 Usando SIG**

Los Sistemas de Información Geográfica se perfilan como una herramienta que con los años se ha convertido en elemento indispensable para hacer todo tipo de análisis que permitan a las ciudades evaluar su crecimiento e identificar patrones de expansión. En este estudio las autoras (Rojas Ortiz & Viveros Soto, 2016) muestran a través de un análisis multitemporal la expansión Urbana que se presentó en la ciudad de San Juan de Pasto, en el cual se abarcó un periodo de 25 años, se utilizó como insumo imágenes del programa espacial Landsat con proyección UTM Datum WGS 84, UTM zone 18, Path:009 y Row:0,59, y con menos del 70% de nubosidad, para cada uno de los años de interés, siendo Landsat TM 4-5 para 1989 y 1999, y Landsat 8 para el 2014, además se utilizó información estadísticas para soportar las dinámicas poblaciones junto a la expansión urbana, así como cartografía oficial para delimitación del área de estudio.

La tarea consistió en analizar la tendencia de expansión en la ciudad, para lo cual se realizó la caracterización de la zona de estudio y se obtuvo mediante el procesamiento de las imágenes, y la clasificación supervisada de coberturas utilizando el software Erdas 2014 y ArcGis 10.2 para la conversión del formato de archivos y la construcción de la cartografía temática. En la fase análisis se construyó bajo tres aspectos; El perímetro urbano, uso del suelo y el crecimiento histórico de Pasto.

Los hallazgos del estudio determinaron en el periodo analizado que la ciudad de Pasto para el año 2014 tuvo un crecimiento urbano de 21.44 km<sup>2</sup>, con una diferencia para el 1989 de 8.54 km<sup>2</sup> y con el año 1999 de 4.27 km<sup>2</sup>, asimismo, el patrón de expansión urbana ha tomado en consideración las limitantes topográficas y del relieve, sin embargo, se evidenció la aparición de concentraciones urbanas asociado a asentamientos subnormales en sectores considerados de amenaza alta, además se observó el cambio en los usos del suelo en zonas anteriormente agrícolas.

#### **4.7.4 Análisis Espacial y Multitemporal de la Cobertura y Uso del Suelo con base en imágenes de Satélites en la Subcuenca Río Dipilto, Nueva Segovia, Nicaragua**

El estudio de Rodríguez Wilmer (2012) se basó en estimar la tasa de cambio de la cobertura y uso del suelo, y las emisiones de CO<sub>2</sub> en la subcuenca río Dipilto, Nueva Segovia, Nicaragua. La motivación por este tema surge pues en Nicaragua no se tienen métodos estandarizados para la elaboración del inventario de gases de efecto invernadero en cinco sectores: energía, agricultura, procesos industriales, desperdicios, uso de la tierra-cambio de uso de la tierra y silvicultura.

Bajo esa perspectiva, y en razón de comparar y cuantificar las diferencias en el uso y cobertura del suelo, y su incidencia en el ciclo del carbono se aplicó técnicas de análisis espacial y percepción remota sobre la subcuenca río Dipilto. Adicionalmente, se utilizó imágenes de satélite, como alternativa de análisis multiespectral en el área de estudio. Para ello se utilizó imágenes de satélite Landsat y trabajo de campo.

El desarrollo de metodológico contó previamente con una descripción de la zona de estudio, que consideró variables de área, población, clima, geología, hidrología, y sistemas bióticos. Lo relacionado con la aplicación de herramientas de sistemas de información geográfica se desarrolló con el apoyo de tres imágenes del satélite Landsat TM, tomadas en las fechas: 23 febrero del año 1993, 7 de abril del año 2000 y 8 de enero del año 2011. A su vez, el trabajo de campo consideró información de un estudio previo, del que se sustrajo como línea base los datos de densidad de carbono calculados en nueve parcelas de bosque de pino en la subcuenca del río Dipilto, los datos de carbono utilizados corresponden de nueve parcelas de muestreo en bosque de pino que fueron correlacionadas, para establecer un modelo de regresión lineal con el objetivo de estimar el Stock de Carbono.

Para el procesamiento de las imágenes, se realizó una clasificación supervisada en la que se seleccionaron píxeles que representaron los patrones de los tipos de cobertura del suelo (áreas de entrenamiento) que se identificaron en campo y que eran de interés representar. Una vez que se identificaron los patrones, se procedió a entrenar al ordenador para identificar píxeles con características similares, en este tipo de clasificación se indica a priori cuáles serán las clases temáticas a tomar en cuenta.

Con la generación de la cartografía temática a partir de la clasificación, se generó el análisis para las imágenes de los años 1993, 2000 y 2011, el cual reveló que durante el periodo de tiempo analizado (18 años) la velocidad a la que se perdieron los bosques latifoliados cerrado fue variable. Durante los primeros 7 años (1993 a 2000) se registró un aumento de 99,95 ha, que corresponde a una

tasa de deforestación de -1.45% anual. Durante los últimos once años (2000 a 2011) esta cantidad cambió totalmente, ya que se eliminaron 331.76 ha, que corresponde a una tasa de deforestación anual de 3.41%. A su vez, a partir de los cálculos de la matriz de transición, se obtuvo que se transformaron más de 232,01 ha por año, correspondiente a una tasa de deforestación anual de 1.55%. Para la estimación del Stock de Carbón, el mapeo del año 1993 señala que 67.76% de área del estudio no estima la fijación de Carbono debido los niveles de reflectancia que no son correlacionados con los datos de campo que fueron considerados en análisis del modelo. Para el análisis de la imagen del año 2011, la distribución de valores de carbono más altos corresponde aproximadamente la localización de la parte media y baja de la subcuenca, demostrando que el Stock de Carbono oscila entre 40-150 t/ha. En términos generales, el 32.85% del área se mantuvo estable y el 46.39% presentó ganancias de 1-210 t/ha.

Finalmente, dentro de las conclusiones el autor define que la combinación de imágenes de resolución espacial media como son las de la serie Landsat para definir trayectorias de cambio de la cobertura del suelo, son una opción viable para la solución de interrogantes relacionadas con el cambio climático, tales como la estimación de las emisiones de CO<sub>2</sub> derivadas del cambio de uso del suelo. Asimismo, el análisis de correlación y modelos de regresión a partir de la información provenientes de sensores remotos y datos de carbono en campo reflejan una alta estimación del Stock de Carbono correspondiente a las áreas de bosque de pino y bosques secundarios joven, no así a las áreas de los bosques latifoliados donde las estimaciones son inexistentes debido a la carencia de datos de campo y variabilidad espectral.

#### **4.7.5 Análisis multitemporal del crecimiento urbano de la zona de expansión para el periodo de 1987 – 2015 en el municipio de Ibagué, Tolima**

Este estudio desarrollado por Tibaquirá (2016) plantea establecer el área de crecimiento en la zona de expansión urbana de la ciudad de Ibagué en el periodo comprendido entre 1987 – 2015. Para el desarrollo metodológico se tomó información del servicio geológico de los Estados Unidos, del cual se utilizó las imágenes satelitales Landsat TM 5 para los años 1987, 1997 y Landsat 8 para el 2015, las cuales, en la etapa de procesamiento fueron sometidas a correcciones radiométricas, geométricas y topográficas, para su posterior clasificación supervisada a partir de muestras propias de la zona urbana utilizando el software PCI Geomática. A su vez, se utilizó información secundaria, correspondiente a fotografías aéreas de los años 1961 y 1980 a escala 1:12.000 del vuelo M-1077 Foto 14669.

Para la diferenciación de coberturas y las definiciones de cada categoría, se retomó la elaboración del mapa de cobertura de la tierra de la cuenca del Río Magdalena metodología CORINE Land Cover adoptada para Colombia, utilizando las categorías de territorios artificializados, territorios agrícolas, bosques-áreas seminaturales, y superficies de agua.

De acuerdo con el autor, la clasificación supervisada se utiliza cuando existe un conocimiento o familiaridad con la zona de estudio, y consiste en la definición manual de áreas piloto que sean representativas de las categorías que componen la leyenda. En la etapa de clasificación se marcan en las imágenes las zonas o áreas con píxeles pertenecientes a un elemento conocido, tales muestras deben abarcar un número mínimo de píxeles y ser representativas del elemento que representan, es importante señalar que la cantidad de muestras debe abarcar distintas situaciones para un mismo elemento.

Para el método de clasificación se utilizó el algoritmo de Mínima Distancia, se obtuvo como resultado el número de píxeles y el porcentaje de área por imagen clasificada. Los resultados obtenidos para la imagen de 1987 mostraron que solo el 4,54% correspondía a área urbana y el 18,94% a cultivos dentro de la zona de expansión. Para el año 1997, el área urbana fue de 6,1%, mientras que la zona de expansión presentó un aumento significativo en relación a los cultivos con un 30,67%. En el 2015 fue evidente la disminución en la zona de cultivos dando paso a proyectos urbanísticos en el área de expansión.

Finalmente, se concluye que la zona rural del municipio mantiene su vocación agrícola, no obstante, se comienzan a configurar otros patrones espaciales en la posesión de la tierra, pasando de tener pequeños minifundios en el año 1987 a ocupar grandes extensiones de cultivos en el año 1997. Para el último año la ocupación de cultivos decrece, para dar paso a las nuevas urbanizaciones.

## **5. METODOLOGÍA**

### **5.1 TIPO DE TRABAJO**

El crecimiento urbano es una condición natural que experimentan las ciudades, y la expansión urbana podría ser el intento de pensar cómo se ha dado dicho crecimiento, más en un país caracterizado por un acelerado proceso de urbanización y con un pasado de explosión demográfica, física y con gran flujo de movimientos migratorios en su interior. En Cali como principal polo de desarrollo del suroccidente del país, las dinámicas de uso de suelo hacen que la transformación urbana sea evidente, especialmente en sectores de influencia, caso de los corredores metropolitanos del Norte y Sur de la ciudad.

Retomando el objetivo de este estudio, en el que se busca analizar los cambios de cobertura en el perímetro urbano, la zona de expansión y especialmente para dos corredores metropolitanos de la ciudad de Cali, se escogió un periodo de 31 años, que abarcan desde el año 1984 al 2015, se consideró estas fechas de acuerdo a la disponibilidad de información y teniendo en cuenta el marco normativo de planificación instaurado en la ley 338 de 1997 y la ejecución de los POT cumplido su periodo de vigencia. Así, este estudio fue desarrollado conforme a los procedimientos definidos en teledetección, en los que se plantea un análisis con enfoque multianual, teniendo por objeto detectar los cambios producidos entre tres momentos dentro de diferentes décadas, para ser comparadas visual y digitalmente.

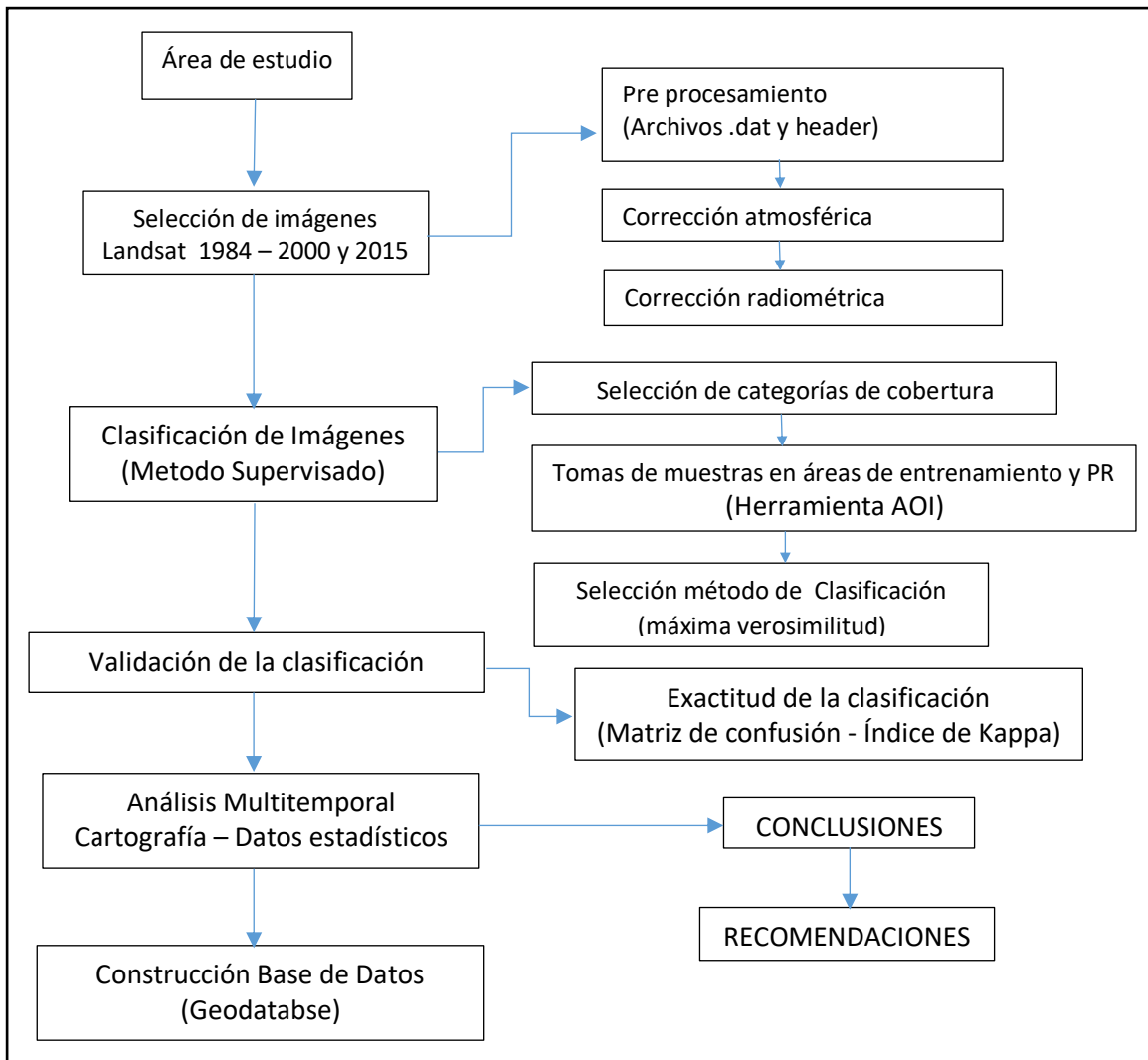
La detección de cambios consiste en identificar diferencias en el estado de una característica o fenómeno a través de observaciones que se hacen en diferentes épocas. Uno de los aportes más destacados de la Percepción Remota es su capacidad para seguir procesos dinámicos, en tal sentido, la información adquirida por un sensor situado en una órbita estable y repetitiva, como lo son las imágenes de satélite, constituyen una fuente muy valiosa para estudiar los cambios que se producen en la superficie terrestre (Riaño Melo, 2002)

De acuerdo con Riaño (2002), los datos adquiridos de sensores remotos y utilizados para estudios de detección de cambios deberán tener las resoluciones temporal, espacial, espectral y radiométrica constantes. Las características de estos parámetros deben ser conocidas por el analista, igualmente se debe identificar como estos aspectos pueden tener un impacto sobre el éxito de un proyecto de detección de cambios con el empleo de la percepción remota.

A continuación se presenta el esquema metodológico para abordar el tema de trabajo y la consecución de los objetivos propuestos, pasos que se orientan a la integración de la información mediante el procesamiento digital, la clasificación y el análisis multitemporal de las imágenes seleccionadas dentro del periodo de tiempo analizado.



**Cuadro 2** Diagrama Metodológico



## 5.2 ÁREA DE ESTUDIO

Santiago de Cali es el epicentro del suroccidente colombiano de cara a la cuenca del Pacífico y como región que abarca varios departamentos. En términos microregionales, Cali tiene un área subregional muy definida, conformada por los municipios de Yumbo, La Cumbre, Dagua, Buenaventura, Santander de Quilichao, Jamundí, Palmira, Candelaria y Puerto Tejada, con los cuales ha establecido interdependencias mutuas que afirman la necesidad de coordinar esfuerzos en materia de ordenamiento territorial (DAPM, 2000).

El área de influencia del presente estudio se localiza sobre la planicie aluvial del río de Cauca, corresponde a la zona urbana definida por el perímetro urbano del municipio de Santiago de Cali, el área de expansión de acuerdo POT del año 2014 y los corredores metropolitanos del Sur con conexión hacia el municipio de

Jamundí y Norte hacia el municipio de Yumbo, por ser los más consolidados en su interacción territorial con la ciudad. Estas zonas constituyen un total de 16822,35 hectáreas, de los que 11919,44 ha corresponden al perímetro urbano, 1633,40 ha al área de expansión, 1450,84 ha al corredor Cali - Jamundí y 1818,66 al corredor Cali – Yumbo. A continuación se presentan los límites desagregados:

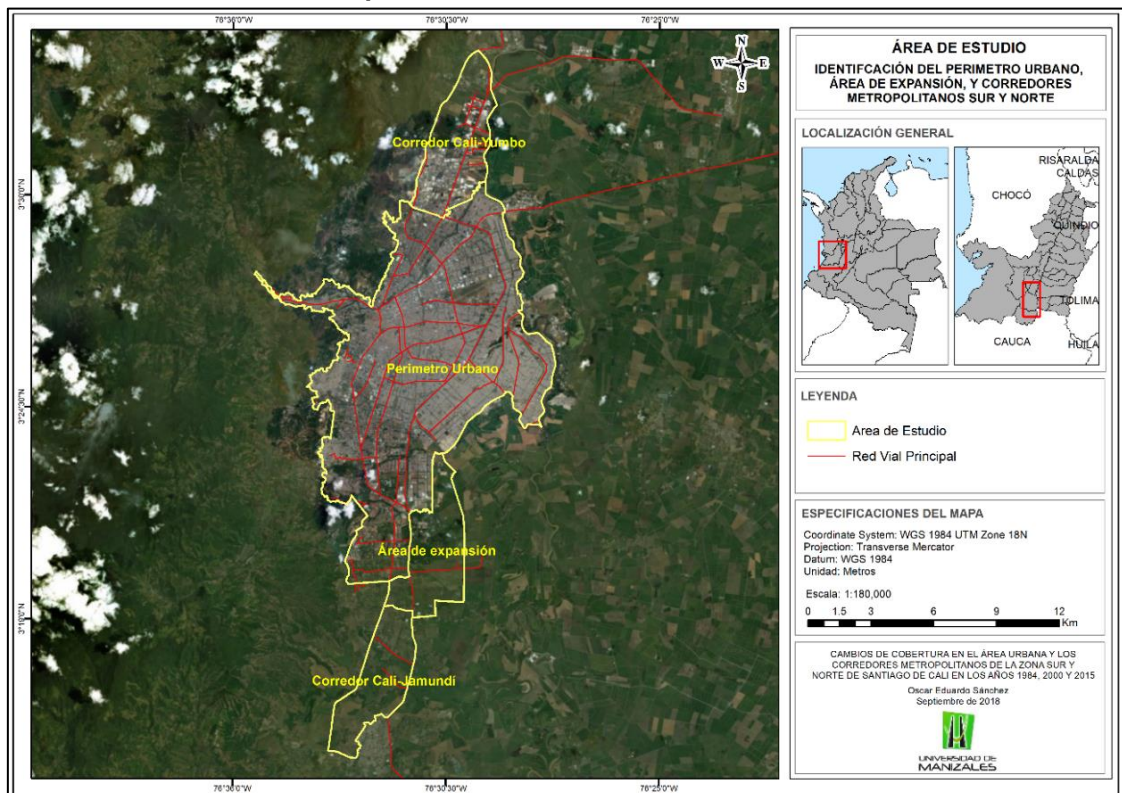
*Límite Occidental:* Comprende las estribaciones de las cordillera occidental, a una altura que promedia los 1.100 metros sobre el nivel del mar. Sobre este sector se encuentran las comuna 1, 20 y 18.

*Límite Oriente:* Comprende suelo de expansión hacia el sur y la margen oriental del río de Cauca hacia el norte.

*Límite Norte:* Está determinado por la Antigua Vía a Yumbo, siguiendo el tramo comprendido entre la confluencia de la carrera 70 con la Avenida 6A norte y la glorieta de Cementos Argos y la autopista Cali-Yumbo desde la carrera 70 en el sector de Sameco hasta confluir con la glorieta de Cementos Argos.

*Límite Sur:* Sigue el trayecto de la vía Cañasgordas y la vía Panamericana que se integran con la zona urbana Jamundí, siendo estas las vías definen el corredor metropolitano.

**Mapa 1** Localización del área de estudio

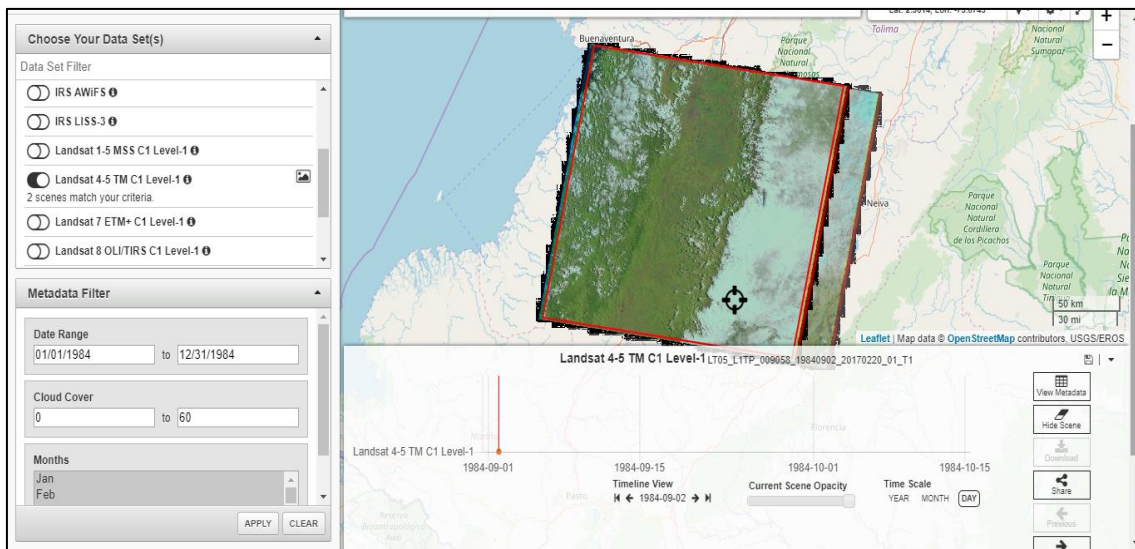


### 5.3 SELECCIÓN DE LAS IMÁGENES

Las imágenes con las que se realizó este estudio fueron adquiridas a través del Portal GloVis, propiedad del Servicio Geológico de los Estados Unidos o USGS por sus siglas en inglés. Este visor de libre acceso, es una herramienta de búsqueda y pedido en línea para datos satelitales. El visor proporciona un mapa de soporte visual con el cual el usuario puede seleccionar el área de interés e inmediatamente ver las imágenes disponibles para la ubicación especificada.

A su vez, GloVis ofrece características de restricción para la selección de imágenes, tales como límites de cobertura de nubes, límites de fecha, y acceso a metadatos. Para este caso, se seleccionó las imágenes dispuestas según la grilla Landsat, que corresponde a una cuadrícula mundial de referencia denominada WRS (Worldwide Reference System) en la que se disponen las imágenes conforme a la ruta del satélite sobre el globo terrestre. Las imágenes de acuerdo a la grilla, corresponden al Path 9 y Row 58, si bien se estableció un mínimo de porcentaje de cobertura de nubes sobre cada escena, dada lo extenso del área que cubre, primó la visibilidad sobre la zona de interés (Ver figura 2).

Figura 1 Vista del Portal GloVis



Las imágenes seleccionadas del programa Landsat corresponden a las versiones 5 TM y 8 OLI/TIRS, en el siguiente cuadro se presentan las características de las imágenes de acuerdo al archivo metadato:

**Cuadro 3** Propiedades de las imágenes

Escena	Imagen 1984	Imagen 2000	Imagen 2015
ID Escena	LT50090581984246AAA03	LT50090582000226XXX03	LC80090582015363LGN01
formato	GEOTIFF	GEOTIFF	GEOTIFF
Versión	Landsat 5	Landsat 5	Landsat 8
Sensor	TM	TM	OLI/TIRS
Fecha adquirida	02/09/1984	13/08/2000	29/12/2015
Hora adquirida	14:49:23	14:56:54	15:19:26
Cobertura de nube	43	50	41,3
Acimut del sol	80.60065809	68.65220959	136.2565698
Elevación del sol	55.77741470	55.13925643	52.96916817
Proyección	UTM	UTM	UTM
Datum	WGS84	WGS84	WGS84
Elipsoide	WGS84	WGS84	WGS84
Zona UTM	18	18	18
Bandas	6 Bandas Multiespectrales 1 Banda Térmica	6 Bandas Multiespectrales 1 Banda Térmica	9 Bandas Multiespectrales 2 Bandas Térmicas
Resolución espacial	Celda multiespectrales 30 metros y termal de 120 metros	Celda multiespectrales 30 metros y termal de 120 metros	Celda multiespectrales 30 metros, celda pancromática 15 metros y termal 30 metros

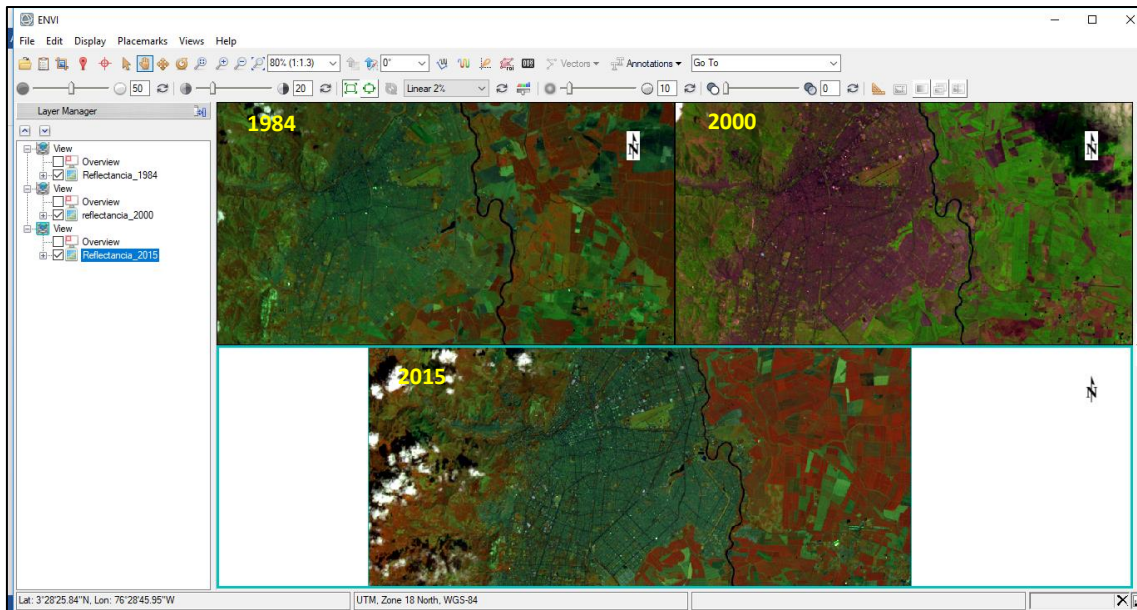
#### 5.4 Pre-pocesamiento de las imágenes satelitales

La energía captada por un sensor remoto pasa por una serie de interacciones que deben ser comprendidas para preprocesar los datos adecuadamente para posteriores análisis e interpretaciones. Más de allá de restricciones como la resolución espacial, espectral, temporal y radiométrica y la complejidad de los elementos naturales, hay que considerar que la energía captada por el sensor sufre una serie de interacciones con la atmosfera antes de llegar al sensor. Consecuentemente, la radiancia registrada por el sensor no es una representación exacta de la radiancia efectivamente emitida por las coberturas. Esto significa que la imagen adquirida en formato numérico presenta una serie de anomalías con respecto a la escena real detectada (Administración de Parques Nacionales, 2005).

Las correcciones en la imagen corresponden a aquellos procesos que tienden a eliminar cualquier anomalía detectada en la imagen, ya sea en su localización, o en los niveles digitales de los pixeles que componen. Estas operaciones tienden a disponer los datos en la forma más cercana posible a una adquisición idónea, tanto en la posición de los pixeles como en la radiancia que significan. (Chuvieco, 1990)

De manera que, el protocolo de pre-procesamiento tiene el objetivo de maximizar la precisión de los resultados obtenidos a partir de la manipulación de las imágenes satelitales. Considerando lo anterior, para las imágenes seleccionadas se aplicó la corrección radiométrica y la corrección atmosférica.

**Figura 2** Imágenes originales



#### 5.4.1 Corrección Geométrica

De acuerdo con Hantson (2011), la primera etapa para utilizar la información de las imágenes de satélite es la georreferenciación, en la que se asigna a cada pixel su coordenada geográfica correspondiente, o encontrando el pixel o grupo de pixeles que proporcionan información sobre una determinada coordenada geográfica, no obstante, las imágenes provistas por el servicio geológico de los Estados Unidos cuenta con ese tratamiento previo, de manera que las escenas Landsat tienen una perfecta correspondencia espacial entre los años y a su vez con la información de referencia, caso Google maps y archivos shapefile de la zona de estudio (Ver imagen 3) .



Figura 3 Imagen Georreferenciada

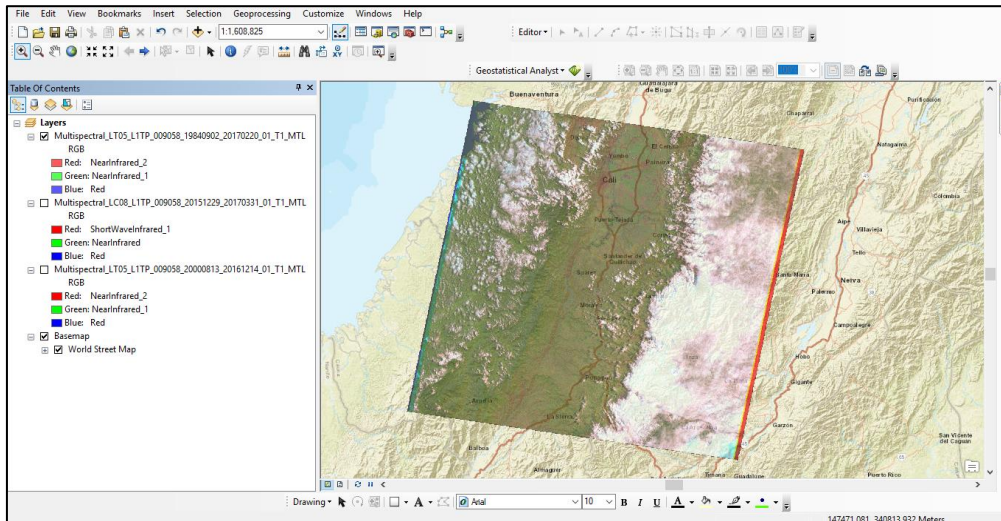
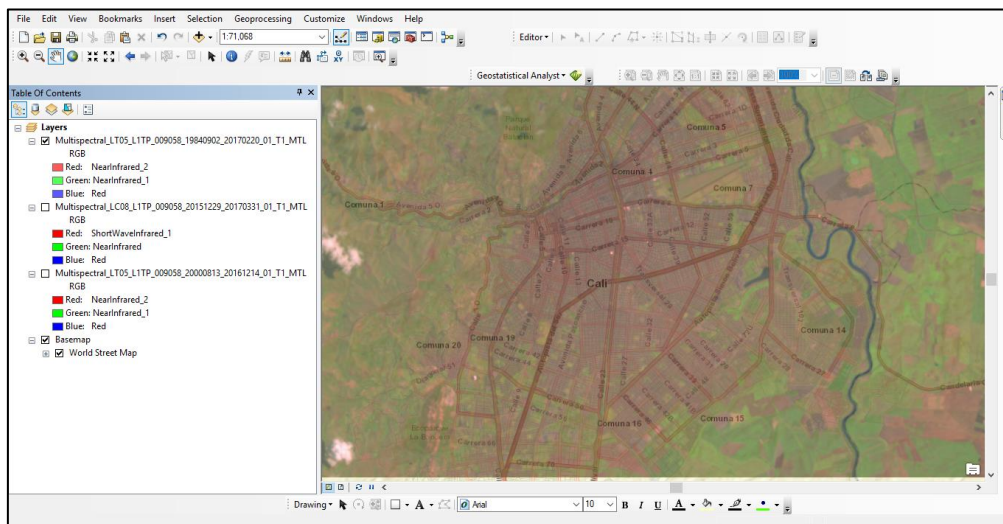


Figura 4 Contraste con información de referencia



### 5.4.2 Corrección radiométrica de las imágenes

En este procedimiento se modifican los ND digitales originales, con el fin expresar los valores de los píxeles en unidades de reflectividad, tal como se esperarían en la imagen. Este concepto aborda las distorsiones por efectos de la atmosfera, así como los problemas radiométricos derivados del mal funcionamiento del sensor.

El proceso de conversión inicia a partir de los ND grabados en la cinta de la imagen, se asume, que, esos ND son traducciones digitales de la radiancia espectral detectada por el sensor. Por tanto pueden convertirse de nuevo a

valores de radiancia a partir de los coeficientes de calibración del sensor. La radiancia se calcula utilizando la siguiente ecuación:

$$L_{\lambda} = Gain * Pixel\ value + Offset$$

Donde  $L_{\lambda}$ , corresponde a la radiancia espectral recibida por el sensor ( $W/(m^2 * sr * \mu m)$ ), *Gain* a la ganancia y *offset* a la pérdida.

De tal forma, considerando que las imágenes de los años 1984 y 2000 corresponden al satélite Landsat-5 TM, la calibración de los niveles digitales para su conversión a valores de reflectancia tomas los coeficientes de los metados definidos para este serie, como se muestran en la siguiente imagen:

**Figura 5** Parámetros metadatos espectrales de las imágenes años 1984 y 2000

Band Names	Wavelengths	FWHM	Radiance Gains	Radiance Offsets	Reflectance
1 Band 1	0.485	0.07	0.67134	-2.19134	0.00133517
2 Band 2	0.569	0.08	1.3222	-4.1622	0.00290617
3 Band 3	0.66	0.06	1.044	-2.21398	0.00270892
4 Band 4	0.84	0.14	0.87602	-2.38602	0.00327867
5 Band 5	1.676	0.2	0.12035	-0.49035	0.00222008
6 Band 7	2.223	0.27	0.065551	-0.21555	0.00308166

En lo que refiere a la imagen del año 2015 que corresponde al satélite Lansat 8, para los valores de pérdida y ganancia en la reflectancia en cada banda de la imagen se tomó del archivo metadato espectral, siendo lo que se muestran en la siguiente imagen:

**Figura 6** Parámetros metadatos espectrales de la imagen año 2015

Band Names	Wavelengths	FWHM	Radiance Gains	Radiance Offsets	Reflectance
1 Coastal aerosol	0.443	0.016	0.012984	-64.92232	0.0000
2 Blue	0.4826	0.0601	0.013296	-66.48124	0.0000
3 Green	0.5613	0.0574	0.012252	-61.2619	0.0000
4 Red	0.6546	0.0375	0.010332	-51.65948	0.0000
5 Near Infrared (NIR)	0.8646	0.0282	0.0063226	-31.61303	0.0000
6 SWIR 1	1.609	0.0847	0.0015724	-7.86187	0.0000
7 SWIR 2	2.201	0.1867	0.00052997	-2.64987	0.0000

Posteriormente a la obtención de la radiancia espectral recibida por el sensor, determinada por la irradiancia solar, la reflectividad de la superficie, y las

condiciones en el momento de la adquisición, se procede a calcular la reflectividad aparente, con la siguiente fórmula:

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

En donde,  $L_{\lambda}$  es la radiancia en unidades de  $W/(m^2 * sr * \mu m)$ ,  $d$  es la distancia del sol a la Tierra expresada en unidades astronómicas,  $ESUN_{\lambda}$  es la irradiancia solar a tope de atmosfera ( $W/(m^2 * \mu m)$ ) y  $\theta$  es la elevación solar en grados.

Es así como el proceso de conversión de ND a reflectividades se realiza en dos momentos; en el primero se realiza la conversión de ND a valores de radiancia a partir de los coeficientes de calibrado del sensor, y en el segundo momento mediante la estimación de valores de reflectividad aparente ( $\rho_{\lambda}$ ), conociendo la irradiancia solar y la fecha de adquisición (de la que se estima la distancia del sol a la tierra y el ángulo cenital).

#### 5.4.2 Corrección atmosférica de la imágenes

La transformación simple de ND a reflectividad únicamente modifica las diferencias de calibración entre bandas de la misma imagen y cambia la escala de medición a un parámetro físico, pero no permite corregir efectos atmosféricos, o aquellos debidos a la influencia de cubiertas vecinas, a los ángulos de observación o las condiciones de iluminación. En definitiva, la reflectividad aparente asume que la observación se realiza en una atmosfera transparente, verticalmente, sobre suelo plano y superficies perfectamente lambertianas (Chuvieco, 1990).

Para la corrección atmosférica de las imágenes se utilizará el método FLAASH (Fast Line-of-sight Atmospheric Analysis of Spectral Hypercubes), el cual se encuentra como un módulo avanzado en el software ENVI, y se basa en el algoritmo de transferencia de radiación MODTRAN4 (MODerate resolution atmospheric TRANsmision), el cual busca eliminar los efectos de la absorción y dispersión, causados por las moléculas y partículas atmosféricas en suspensión, de la radiancia recibida por el sensor y convertir esa radiancia a valores de reflectividad de superficie. Este módulo se basa inicialmente en la ecuación estándar de radiancia espectral para cada píxel del sensor, que se aplica al rango de longitud de onda solar y superficies Lambertianas, planas o sus equivalentes. ( Aguilar, Mora, & Vargas, 2014)

Para calcular la corrección atmosférica, se debe considerar los pasos metodológicos previos, lo referente a los valores obtenidos para la conversión de ND a radiancia, la identificación de las bandas conforme al metadato, que corresponde a la percepción del sensor en un rango de longitudes de onda. La



remoción de dispersión atmosférica que en el módulo FLAASH se encuentran como aproximaciones de los valores de vapor de agua según distintas latitudes y épocas de captura de la imagen, la elevación promedio del suelo, el tipo de sensor, la altitud del sensor con respecto al nivel del mar, la fecha y la hora de la captura. Y finalmente, la compensación de las distorsiones por aerosoles, haciendo referencia a los aerosoles y partículas en suspensión que producen distorsiones heterogéneas distribuidas aleatoriamente en la imagen.

La corrección atmosférica con el módulo FLAASH se configura de forma manual para cada imagen, se especifican los parámetros relativos a la geometría de observación y condiciones atmosféricas conforme al archivo metadato. En el proceso de corrección el algoritmo utiliza atmósferas estándar que pueden ser ajustadas a las condiciones de la imagen especificando un multiplicador para el vapor atmosférico de agua y el contenido de aerosoles (visibilidad).

A continuación se presenta los procesos de corrección radiométrica para la imagen del año 1984, conforme a los pasos metodológicos para su tratamiento, en esta fase las imágenes fueron sometidas a un recorte de acuerdo con el área geográfica de estudio, con el fin de facilitar los procesos del programa y la posterior selección de las categorías de clasificación:

**Figura 7** Apariencia preprocesamiento imagen año 1984

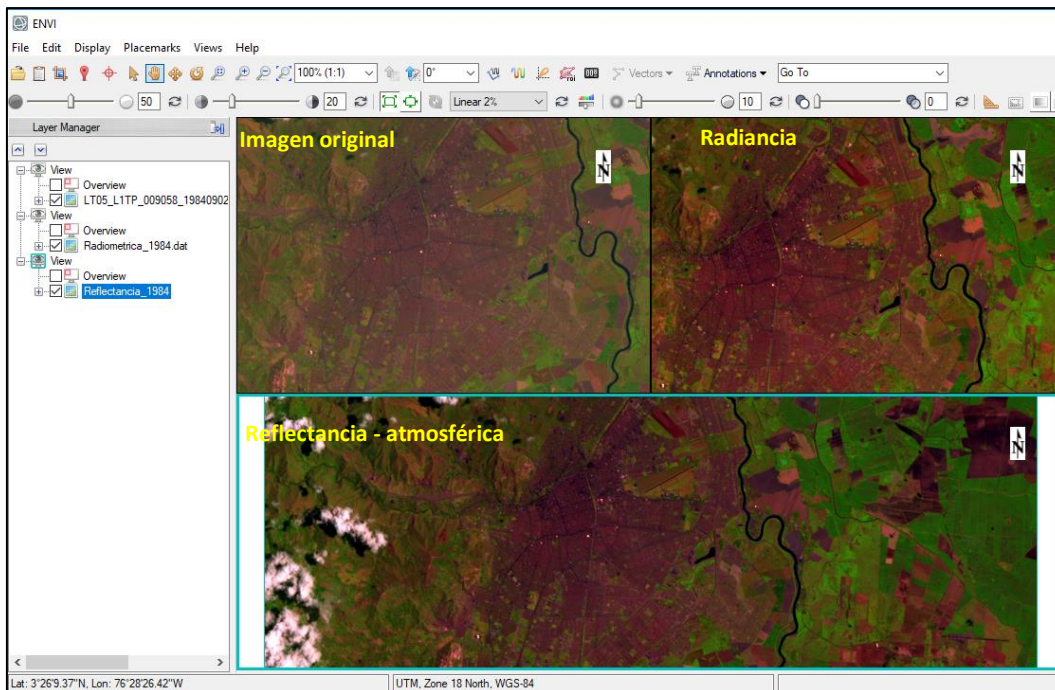


Figura 8 Apariencia preprocesamiento imagen año 2000

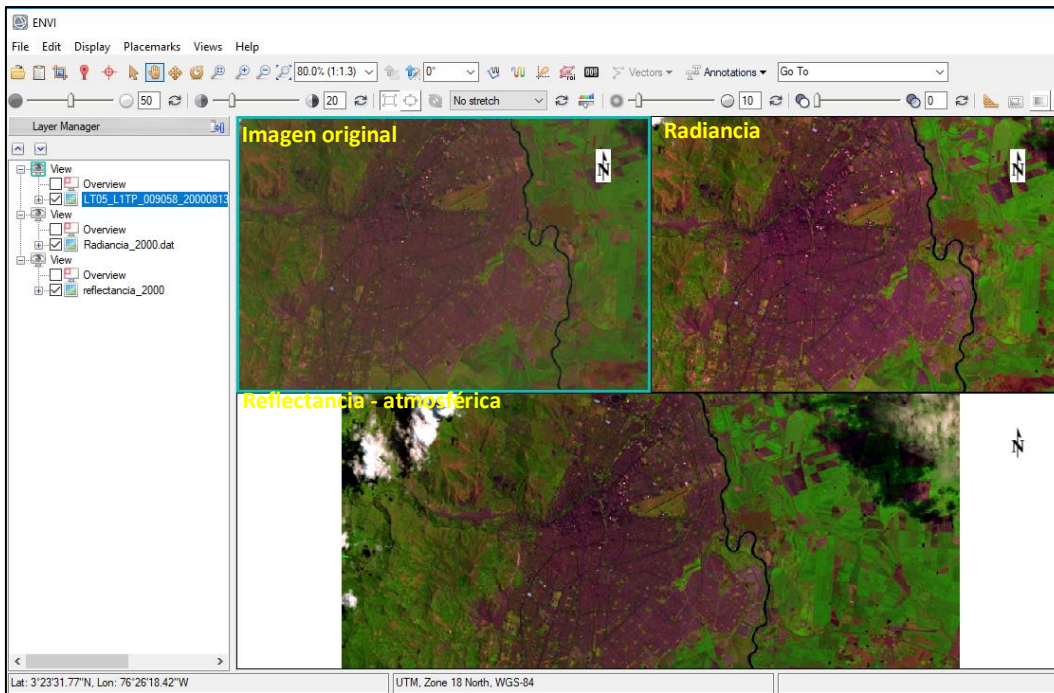
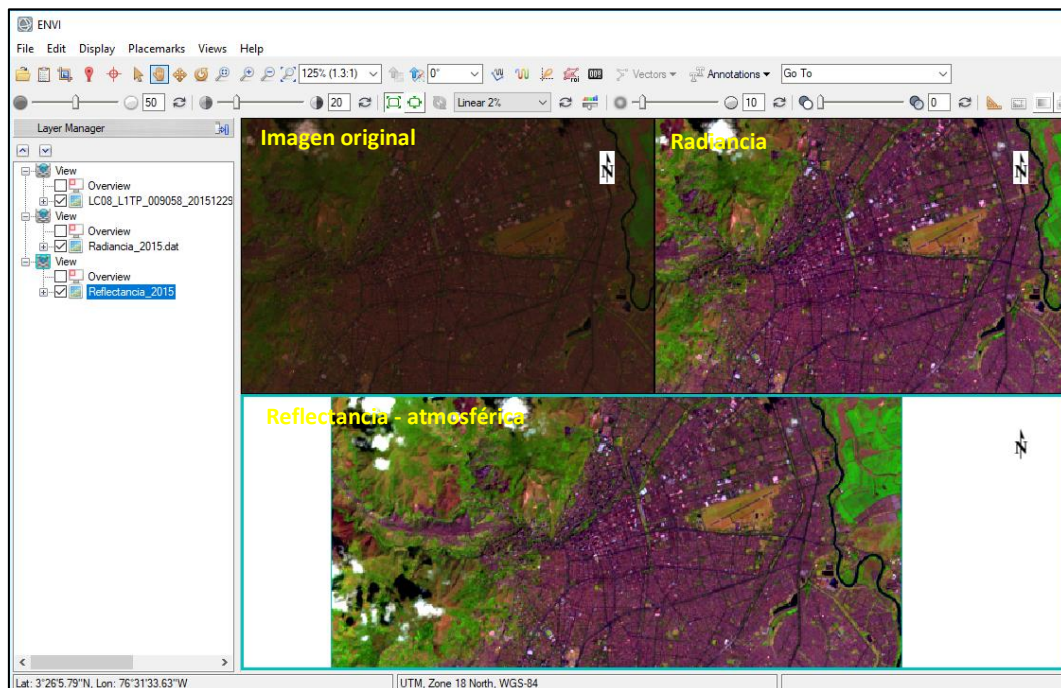


Figura 9 Apariencia preprocesamiento imagen año 2015



## 5.5 Etapa de clasificación de las imágenes satelitales

La clasificación de una imagen multibanda consiste en categorizar dentro de una imagen multibanda los ND continuos medidos por el sensor a una escala nominal o categorica, de manera que cada pixel en la superficie pertenece a una categoría definida previamente. Las clases definidas pueden describir distintos tipos de cubiertas dentro de una escala nominal, u ordinal cuando se trate de intervalos de una misma categoría. De manera que, una clasificación de la cobertura del suelo será de tipo nominal, y la categorización de los niveles de afectación de un incendio lo será de tipo ordinal ( Yébenes Gómez & Giner Sotos, s.f.).

Previamente, en la revisión literaria se habló de los métodos de clasificación existente, el **supervisado** que parte de un conocimiento previo de área de estudio del cual se selecciona una serie de muestras para definir las categorías. Por su parte el método **no supervisado**, se define como un proceso de agrupación de pixeles con valores digitales similares para todas las bandas, y en donde cada una de estas agrupaciones son llamadas clases espectrales, las cuales se supone corresponden a un tipo de cubierta de terreno. La aplicación de esta clasificación opera como una búsqueda automática de grupos de valores homogéneos dentro de las imágenes (Arango Gutiérrez, Branch Bedoya, & Botero Fernández, 2005).

De acuerdo con lo anterior, considerando el conocimiento que se tiene del territorio y su contexto espacial, el metodo utilizado para la clasificación de las imagenes satelitales del perimetro urbano de Santiago de Cali, la zona de expansión y los corredores metropolitano del Sur y Norte en el periodo de analisis establecido se fundamentó en el metodo supervisado, sobre el cual se definieron las categorias de clasificación. No obstante, se realizó la clasificación de las imágenes utilizando el metodo no supervisado, con el fin contrastar los resultados obtenidos entre las clasificaciones. Para la consecución de estos resultados, el procesamiento fue abordado mediante el software ENVI 5.3 que brinda una variada oferta de algoritmos de clasificación.

Para efectos de discriminar la coberturas en las imagenes, se utilizaron composiciones en falso color a fin de identificar plenamente aspectos relacionados con la vegetación, los usos del suelo o las masas de agua. En tal sentido se utilizó la combinación 4-5-3 (una banda en la región visible y dos en la del infrarrojo), que permite una diferenciación de la vegetación en tonos de marrones y naranjas. Las áreas urbanas y el suelo desnudo aparecen en tonos de turquesa, mientras el agua aparece en tono azul oscuro.

La otra combinación utilizada fue 5-4-3 (Dos bandas en el infrarrojo y una en el visible), en donde la vegetación se muestra en diversas tonalidades de verde,

que varían en función del tipo y de las condiciones de ubicación; Las áreas urbanas se presentan en tono violeta, y el suelo desnudo en tonos violetas a rosados; El agua aparece en negro.

### 5.5.1 Metodo no supervisado

De acuerdo con Chuvieco (2000), las categorías obtenidas en esta clasificación no siempre pueden equipararse a las clases informacionales que el usuario pretende deducir, por lo que su intervención se centrará en la interpretación de los datos. Este método de clasificación automática plantea para el agrupamiento de los pixeles un triple proceso, involucrando la selección de variables que intervienen en el análisis (Bandas espectrales), selección de un criterio para medir la similitud o distancia entre casos (Pixeles) y selección de un criterio para agrupar los casos similares (Niveles digitales).

La delimitación de los grupos espectrales se rigen por dos criterios: uno corresponde a la medición de la similitud entre pixeles y otro que define las condiciones del proceso de agrupamiento. Para el primero, el más utilizado es el de la distancia euclidiana

$$D_{a,b} = \sqrt{\sum_{k=1}^m (ND_{a,k} - ND_{b,k})^2}$$

Donde  $D_{a,b}$  indica la distancia entre los pixeles  $a$  y  $b$ ;  $ND_{a,k}$  y  $ND_{b,k}$  a los niveles digitales de esos pixeles en la banda  $k$  y  $m$  al número de bandas.

En cuanto al segundo, uno de los algoritmos de agrupación más frecuentemente usados y estudiados en la clasificación no supervisada es el ISODATA (Interactive Self-Organizing Data Analysis Algorithm). Este algoritmo clasifica los pixeles de acuerdo al valor de su vecino más próximo, para ello procede a partir de las siguientes fases:

- I. Se señalan un aserie de centros de clase, de acuerdo al número y forma indicados por el usuario.
- II. Se asignan todos los pixeles de la imagen al centro de la clase más próxima.
- III. Se calculan los nuevos centros de clase, teniendo en cuenta los valores de todos los pixeles que se hayan incorporado en la fase anterior.
- IV. Se vuelven a asignar todos los pixeles de la imagen al centro más cercano, el cual debido al desplazamiento registrado en (III) no tiene por qué coincidir con la anterior asignación realizada en (II).
- V. Vuelven a calcularse los centros de clase, teniendo en cuenta las nuevas incorporaciones, y se retoma la fase (IV).



Estadísticamente, este algoritmo permite delimitar los grupos de valores homogéneos dentro de la imagen, no obstante, ante el desconocimiento por parte del usuario de las clases espectrales, ni la dispersión o distancia entre las clases de la imagen, resulta complejo estimar los parámetros de control (Ver imágenes ).

Figura 10 Algoritmo de Clasificación No supervisada

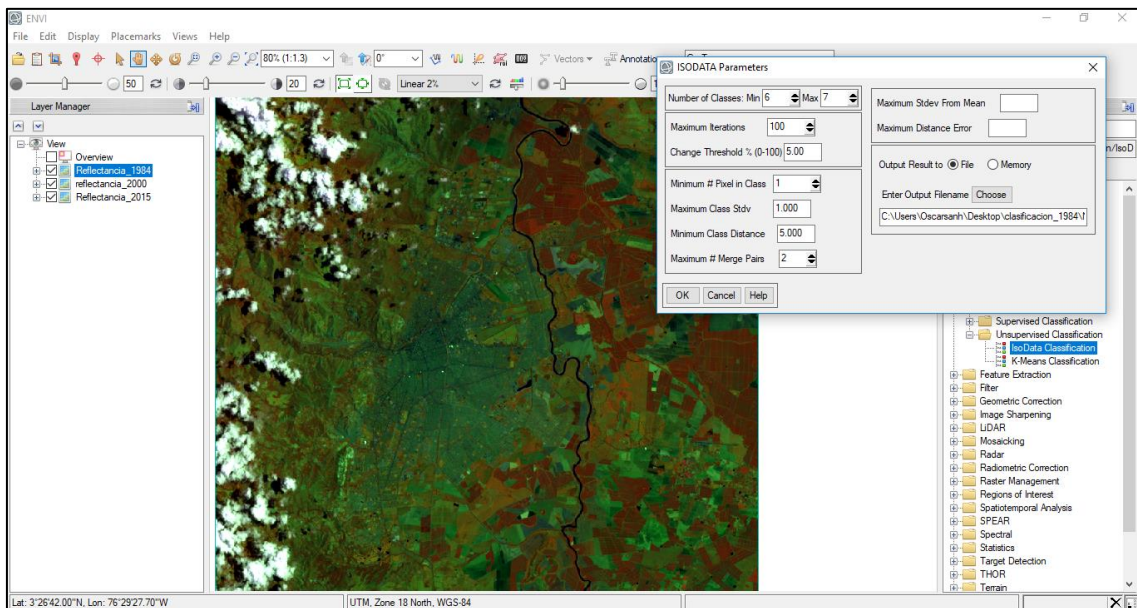
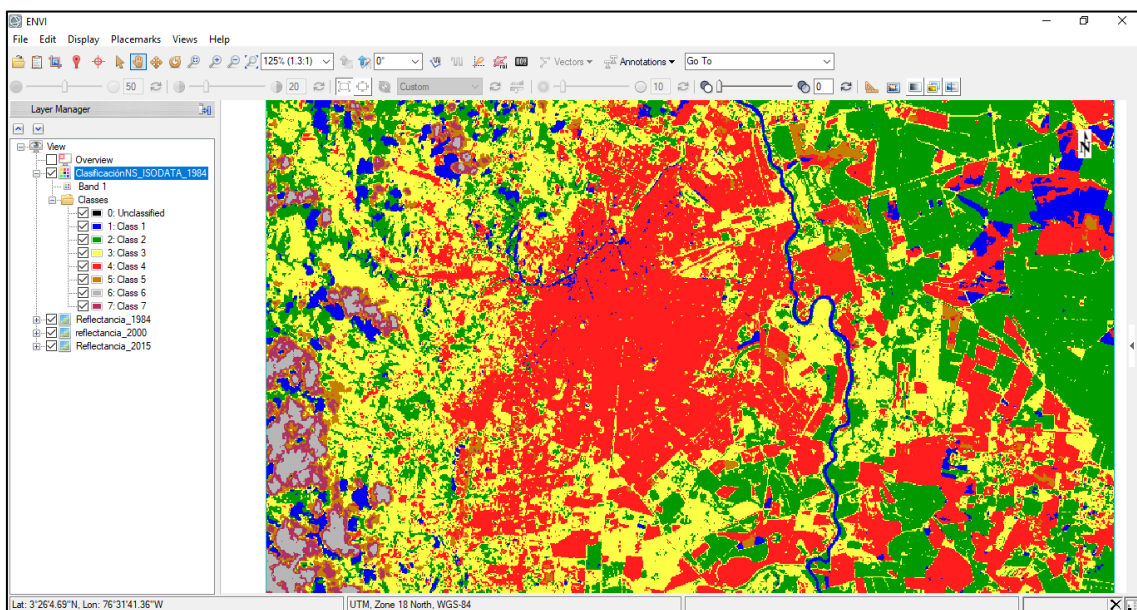


Figura 11 Resultado Clasificación No Supervisada



## **5.5.2 Metodo supervisado**

Para clasificación supervisada ya descrita anteriormente, se siguieron una serie de pasos conforme a como lo establecen los protocolos de procesamiento para imágenes Landsat. La utilización de este metodo establece como paso previo, la selección al interior de la imágenes de zonas para la seleccion de pixeles asignados a algun tipo de cobertura conforme al conocimiento de la zona.

### **5.5.2.1 Selección de las Áreas de entrenamiento**

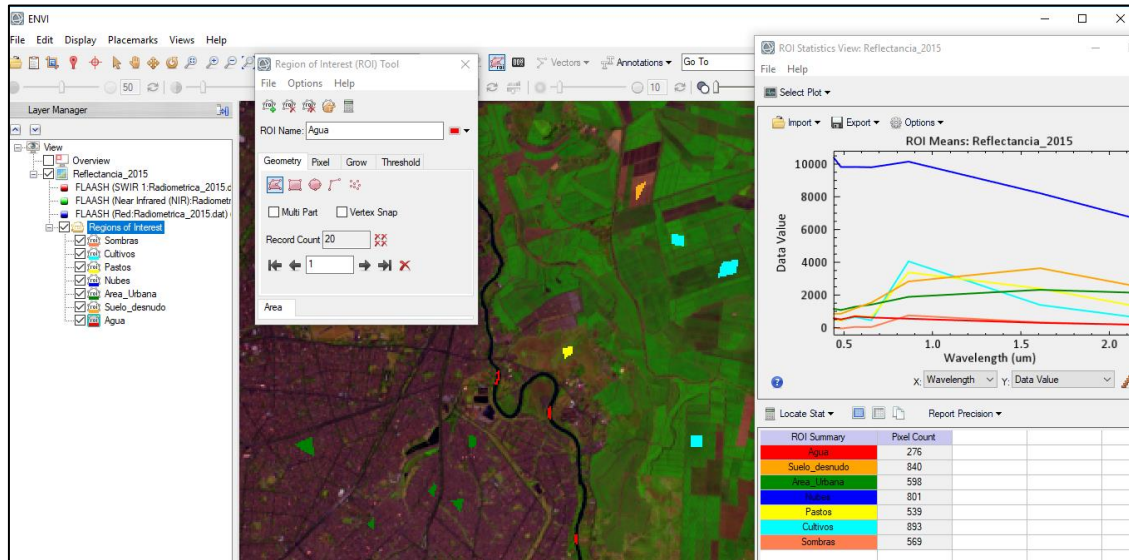
Consiste en la identificación de áreas piloto, en donde a sus pixeles se les asigna a un conjunto de clases con firmas espectrales de similares características, especialmente en áreas representativas dentro de la imagen de las que se conoce de antemano la clase a la que pertenecen, para ello previamente se debe realizar una lectura de la imagen en donde se reconocen e identifican los objetos en escena, y que a su vez tiene una respuesta espectral asociada al área o clase de interés.

En el caso particular de este estudio, las imágenes corresponden a tres momentos diferentes, siendo los años 1984, 2000 y 2015. Al interior de las imágenes se seleccionaron areas de entrenamiento en las que se consideró la interpretación visual asociado a patrones en la superficie, en las imágenes de 1984 y 2000 se reconoció su antigüedad, no obstante, se recurrió a revision bibliografica bibliografía para el reconocimiento historico que diera cuenta de la ocupación del suelo y el agrupamiento general de las coberturas. De esta manera, para las tres imagenes se identificó; zonas de cultivos y suelo desnudo principal en la zona oriental, vegetacion/pastos hacia el sur el occidente, y cobetur urbana (o área construida) en lo referente al perimetro de la ciudad y sus corredores, asi como otras cobertura asociadas a los cuerpo de agua y las condiciones atmosfericas como nubes y sombras. A su vez, las áreas de entrenamiento se asumieron considerando la comparación de la firma espectral de cada cobertura en las imágenes y mediante el apoyo de una imagen de alta resolución para un mayor detalle dentro de zonas especificas en cada escena.

Dentro de este estudio, la fase de entrenamiento como paso previo a la etapa de calificación de las imágenes se desarrolló utilizando la herramienta “Regiones de Interés” (ROI) del software ENVI 5.3, mediante está se trazaron los polígonos asociados a las cobertura en la superficie definiendo las mismas clases de entrenamiento para los tres años. Para la selección de las zonas en la imagen del año 2015 además de la interpretación visual de la imagen Landsat 8 se utilizó apoyo de imágenes de alta resolución de las plataformas de Google Map y ArcGis. En lo referente a las imágenes de los años 1984 y 2000, las respuestas

espectrales de las clases identificadas en la imagen del 2015 sirvieron de insumo base para la selección de las zonas de entrenamiento.

**Figura 12** Selección de las áreas de entrenamiento, Imagen 2015.



Para una tener una representatividad equilibrada entre las clases, en cada imagen se trazaron 20 polígonos por cada clase en diferentes zonas de la imagen según la identificación de los patrones y el comportamiento espectral de cada cobertura sobre la superficie.

Contextualizando las particularidades sobre la ocupación del suelo en el área de estudio y las clases definidas en las áreas de entrenamiento para la preparación de la clasificación de la imagen, se pudo relacionar previamente las coberturas con usos específicos de la zona, de manera que; las *cultivos* corresponden a plantaciones de caña de azúcar que son característicos de la zona plana en departamento del Valle del Cauca, el *suelo desnudo* a parcelaciones o zonas en preparación para cultivos de caña azúcar, a su vez los *pastos o vegetación* a la oferta ambiental que se localiza sobre la cordillera occidental, en sectores dispersos del perímetro urbano y sobre el corredor Cali-Jamundí.

### 5.5.2.2 Algoritmo de Clasificación de las imágenes

Para la gran mayoría de usuarios, la clasificación supone la etapa culminante del tratamiento digital de imágenes, pues los resultados obtenidos definen la calidad del proyecto desarrollado. En tal sentido, los ND captados por el sensor, no tienen sentido en sí mismos, sino en cuanto son interpretables y convertidos a categorías de análisis en el territorio. Como fruto del tratamiento digital de las imágenes se obtienen productos cartográficos con el inventario de las categorías de objeto de estudio, debe aclararse que la clasificación no busca una definición

abosluta de cada cubierta, que pudiera ser aplicable a cualquier imagen, busca una caracterización particular de una imagen asociado a un territorio en concreto (Chuvienco, 1990).

Posterior al proceso de selección de las áreas de entrenamiento y las definición de las categorías para la clasificación, se da paso a la fase de "Asignación" en la cual se adjudica cada uno de los píxeles a una clase. De acuerdo con Chuvienco (1990), los criterios más empleados para este proceso corresponden a:

**Clasificador de mínima distancia:** se basa en el criterio de asignar un píxel a una de las categorías más cercanas, siendo, en aquella que minimice la distancia entre ese píxel y el centroide de clase. Es resultado de la comparación los ND con los del centro de las distintas categorías en todas las bandas.

**Clasificador de paralelepípedos:** En este método es el usuario quien fija el área de dominio para cada teniendo en cuenta sus valores de centralidad y dispersión. Posteriormente, un píxel es asignado a dicha clase si su ND están dentro de ese área de dominio en todas las bandas consideradas.

**Clasificador de máxima probabilidad:** Este método considera que los ND en el seno de cada clase se ajustan a una distribución normal, lo que permite describir una categoría por una función de probabilidad a partir de su vector de medias y matriz de varianza-covarianza. Por lo tanto, esta función asemeja la distribución normal de los ND en cada categoría, permitiendo calcular la probabilidad de que un píxel asociado a un nivel digital sea asignado a una categoría. el cálculo se realiza para todas las categorías que intervienen en la clasificación, asignando el píxel a aquella que maximice la función de probabilidad.

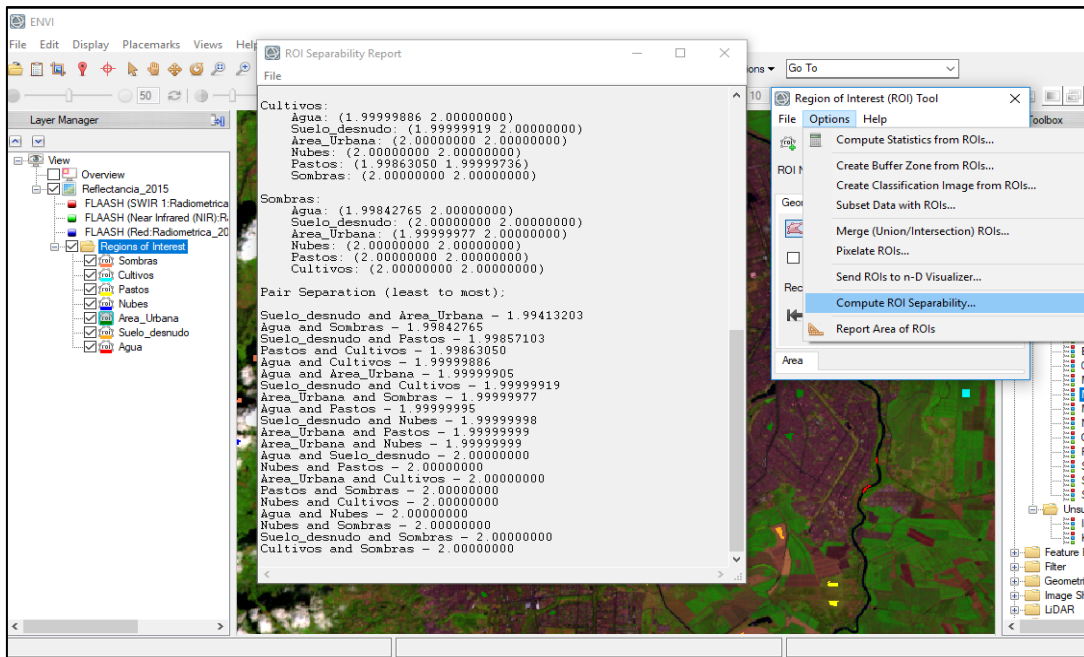
Considerando los métodos planteados, para este estudio se optó por trabajar con el algoritmo de máxima probabilidad, pues resulta ser el más complejo y el que implementa el mayor volumen de cálculos, así como el que mejor representa la asignación de los píxeles con las coberturas terrestres.

De esta manera, mediante el Software Envi 5.3 se procedió a realizar la clasificación supervisada de las imágenes, siguiendo los pasos que se muestran a continuación.

**Paso 1. Índice de separabilidad:** Previo a la clasificación se realiza un análisis de separabilidad espectral entre los polígonos definidos en las zonas de entrenamiento y si tales muestras son similares estadísticamente. Con este procedimiento se establece el grado de diferenciación entre las clases. En la siguiente figura se puede apreciar que la separabilidad entre las clases es alta al estar entre valores máximos de 2 y 1.99, por lo que el programa no incurrirá en confusiones en el momento de los cálculos para la clasificación. (Figura 10).

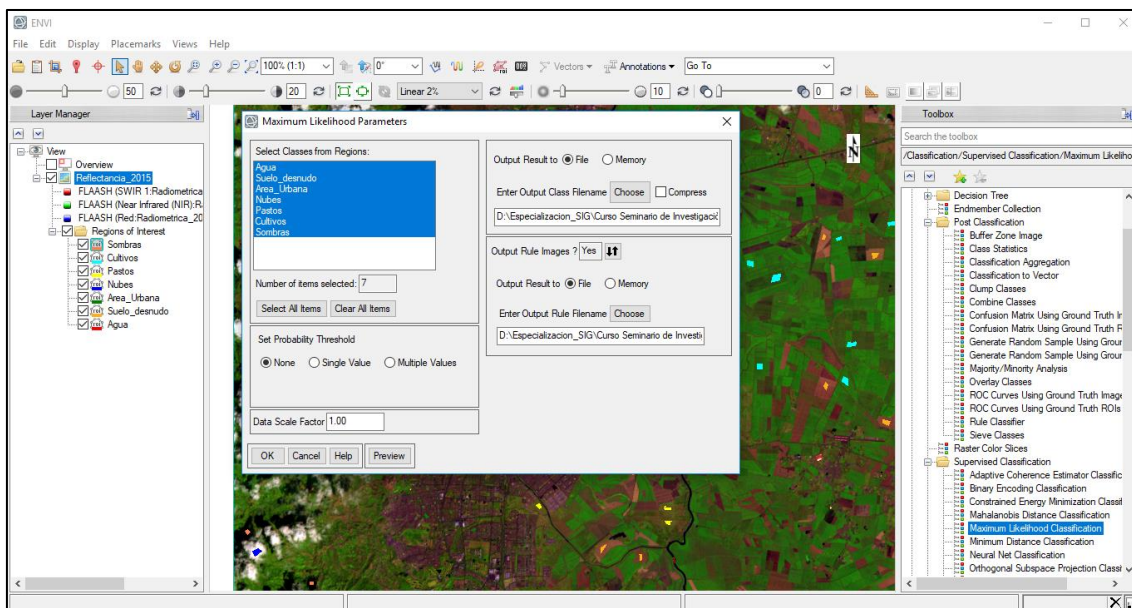


Figura 13 Índice de separabilidad



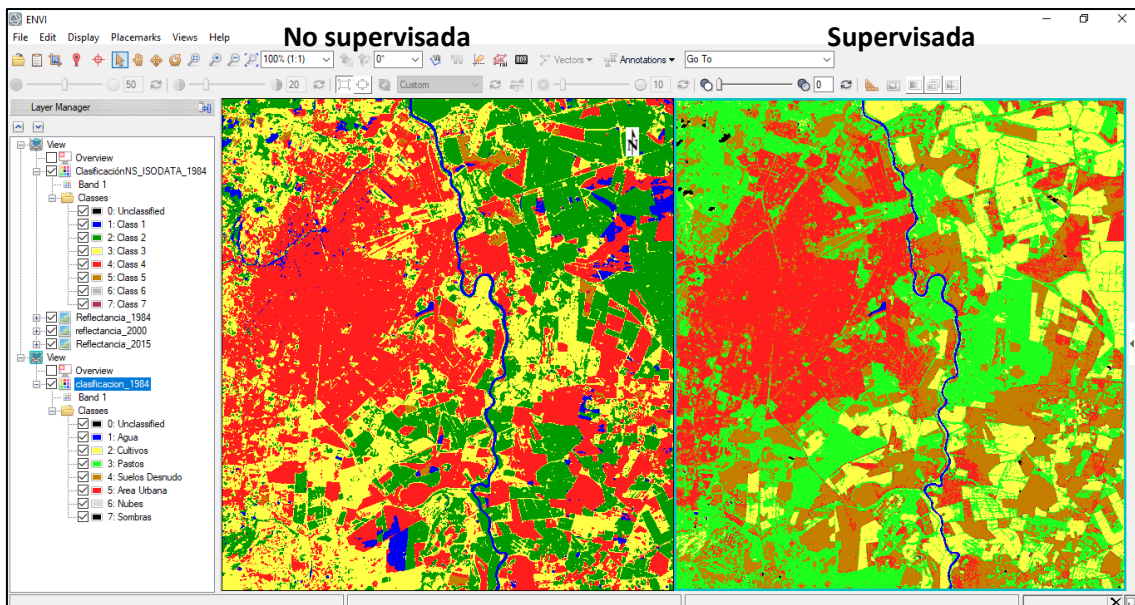
**Paso 2. Clasificación supervisada (Algoritmo Máxima probabilidad):** Posterior al análisis de separabilidad se procede a la clasificación, este corresponde a un proceso automático asistido por el Software, en el que se utiliza las imágenes sometidas a las correcciones previas y se basa principalmente en las áreas de entrenamiento definidas con anterioridad. Como se mencionó, en este proceso se agrupan todos los píxeles de las imágenes en alguna de las clases predeterminadas las cuales se visualizarán en una nueva imagen tipo raster.

Figura 14 Clasificación supervisada 2015



Al generarse la clasificación Supervisada, se procedió a contrastarla con la clasificación No supervisada, pudiendo identificar en la segunda, que la asignación de los pixeles a las clases definidas presentan significativas diferencias. Estas diferencias están dadas en la clasificación No supervisada por la confusión del programa a causa de la similitud de la firma espectral entre las clases, lo cual no permitió la plena separabilidad, es así como las coberturas de agua se confunden con las sombras de las nubes, el suelo desnudo con el área urbana y los pastos con algunas zonas de cultivos.

Figura 15 Comparación de Clasificaciones



**Paso 3. Evaluación de la clasificación:** La evaluación de la exactitud temática corresponde al grado en el cual la imagen obtenida de la clasificación concuerda con la referencia usada para la clasificación. Esta verificación se realiza con un listado de puntos test, los cuales se establecieron en zonas que tienen un similar comportamiento espectral, estos complementan los señalados en los puntos entrenamiento empleados en la clasificación, con estos datos se construye la matriz de confusión en la que se sintetizan los conflictos que se presentan entre las categorías. De acuerdo con Chuvieco (1990), se trata de una matriz bidimensional en el que las filas se ocupan por las clases de referencia y las columnas por las categorías deducidas de la clasificación, la diagonal expresa el número de puntos de verificación en donde se produce acuerdo entre el mapa de salida y la realidad, mientras los marginales suponen errores de asignación, que pueden ser de dos tipos; Omisión y Comisión. Omisión cuando los pixeles son asignados erróneamente a una categoría, y Comisión cuando las categorías son excesivamente amplias y los pixeles se asignan a una clase que no corresponde, a diferencia de la primera, depende de la exactitud del usuario.

Así, la fiabilidad del mapa dependerá de la relación entre el número de puntos correctamente asignados y el total.

El uso de la matriz de confusión permite desarrollar toda una serie de medidas estadísticas que concluyen el proceso de validación. Chuvieco (1990) las define como fiabilidad global del mapa, fiabilidad del usuario y del productor, y el índice de Kappa. El primero, calcula el número de píxeles correctamente clasificados divididos por el total de píxeles de la muestra, esta relación la expresa en valores de porcentaje. En el segundo, el cálculo de fiabilidad del usuario, se expresa mediante la división del número de píxeles clasificados correctamente por el número de píxeles de la fila clasificados en dicha clase, a su vez, la fiabilidad del productor, se calcula por columnas y está dada por la división del número de píxeles correctamente clasificados y el número de píxeles de muestra utilizados en la clasificación de esa clase. Finalmente, el índice de Kappa mide la exactitud lograda en la clasificación con un clasificador y la capacidad de lograr una clasificación correcta con clasificador aleatorio.

De acuerdo con Olaya (2014), en el índice de Kappa el valor 1 indica una concordancia completa, mientras que el -1 define una correlación de signo negativa. Valores alrededor de 0 indican que no existe correlación entre las capas. Valores por encima de 0.75 indican en general una muy buena correlación.

Considerando lo anterior, y tras ser expuestas a las imágenes producto de la clasificación al proceso de evaluación, se puede determinar que la discriminación de las categorías presenta alta precisión, pues el índice de Kappa se encuentra en valores próximos a 1 (figuras 11, 12 y 13).

Figura 16 Matriz de confusión clasificación 2015

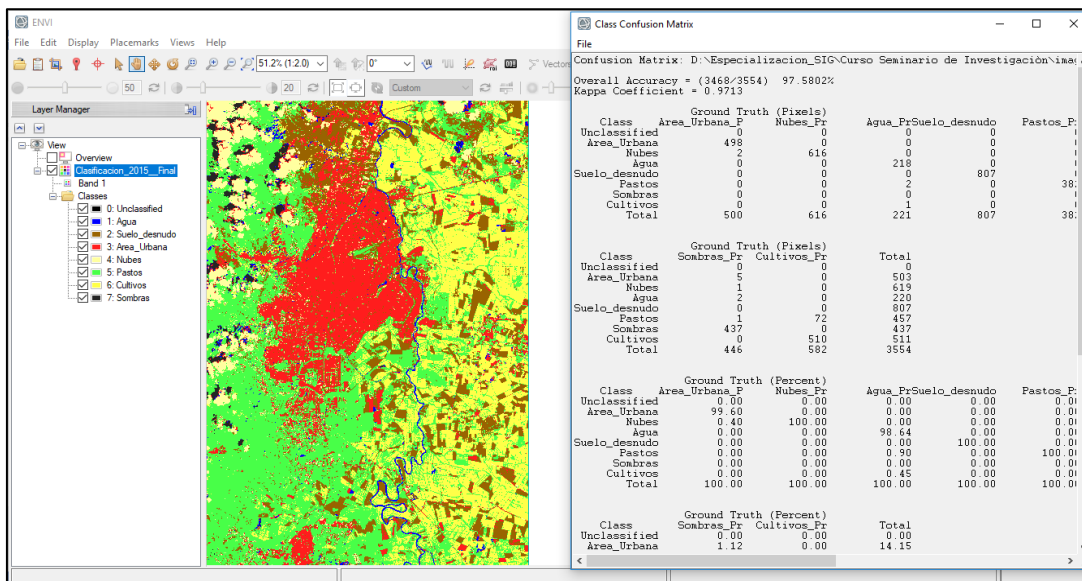


Figura 17 Matriz de confusión clasificación 2000

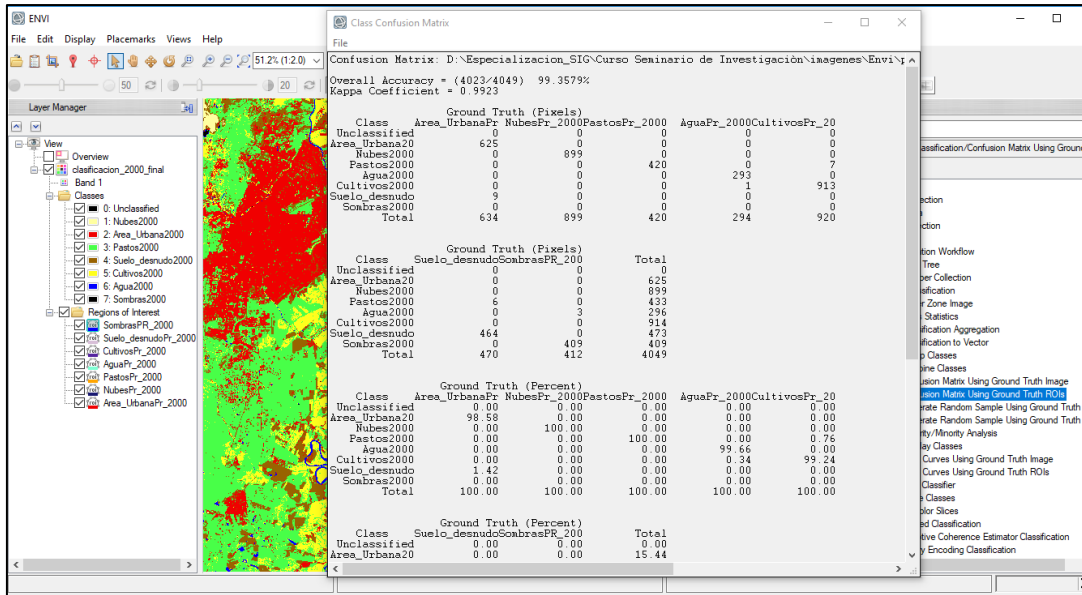
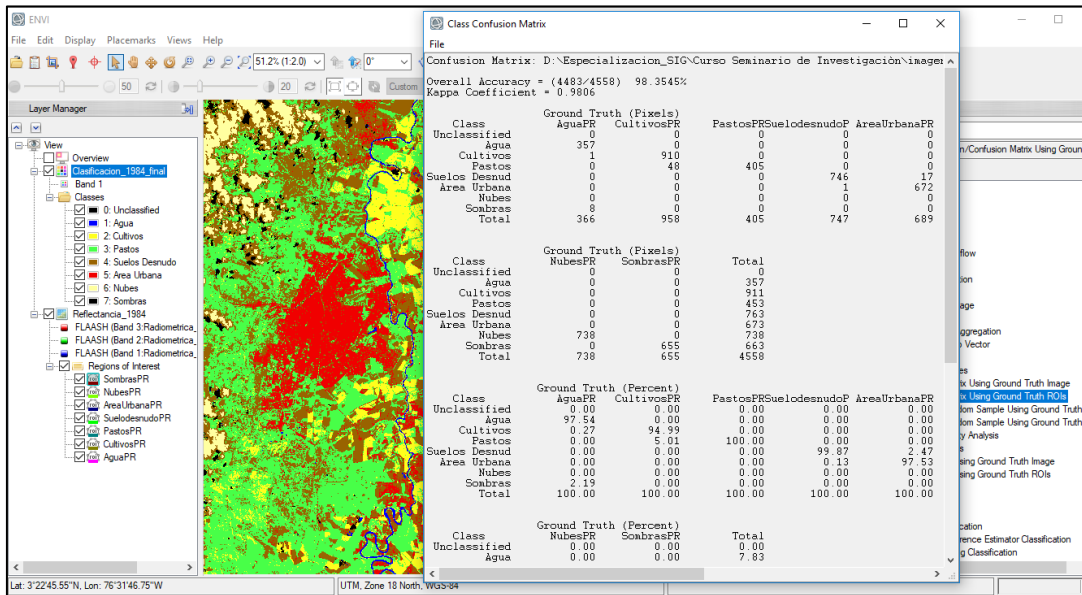


Figura 18 Matriz de confusión clasificación 2015

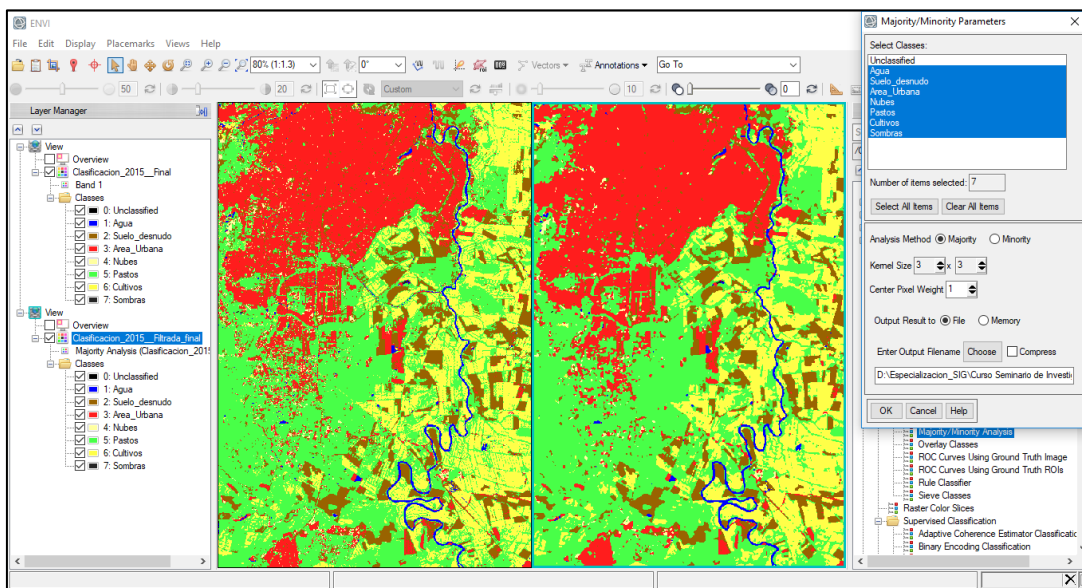


**Paso 4. Etapa de Post-clasificación:** Terminada la fase de clasificación, se procede a la post-clasificación de la imagen, en la que se aplica un filtro que permite suavizar la imagen o eliminar el efecto conocido como “sal y pimienta”. Este filtro permite generar un realce visual en la imagen al eliminar valores anómalos que generan pérdida de la unidad geográfica, al punto se asemejan los ND de los píxeles a los de los píxeles vecinos, reduciendo la variabilidad espacial de las clases en la imagen obtenida.

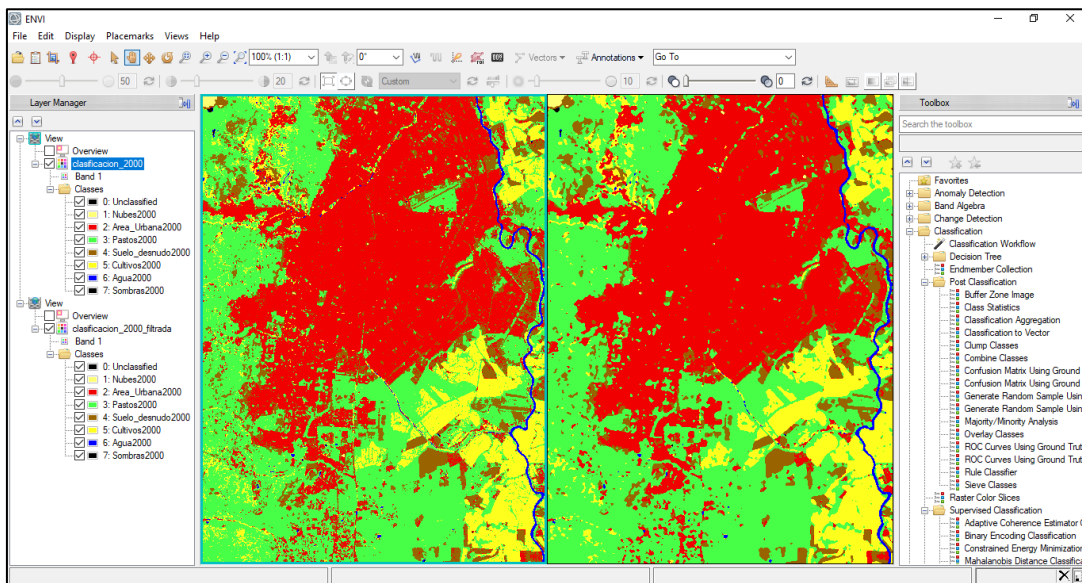


Este filtro funciona como una ventana móvil con un tamaño de 3 x 3 píxeles que se aplica a toda la imagen, en este estudio se utilizó el filtro denominado de mayoría, en el cual el píxel se asigna a la categoría que cuente con la mitad más uno de los píxeles vecinos, en caso de que no se cumpla esta condición el píxel permanece con el valor inicial. A continuación, en las figuras 14, 15 y 16 se presenta los resultado obtenidos en la imágenes, en las figura de la izquierda se presenta la imagen con la clasificación inicial, en la derecha luego de ser sometida al proceso de post-clasificación.

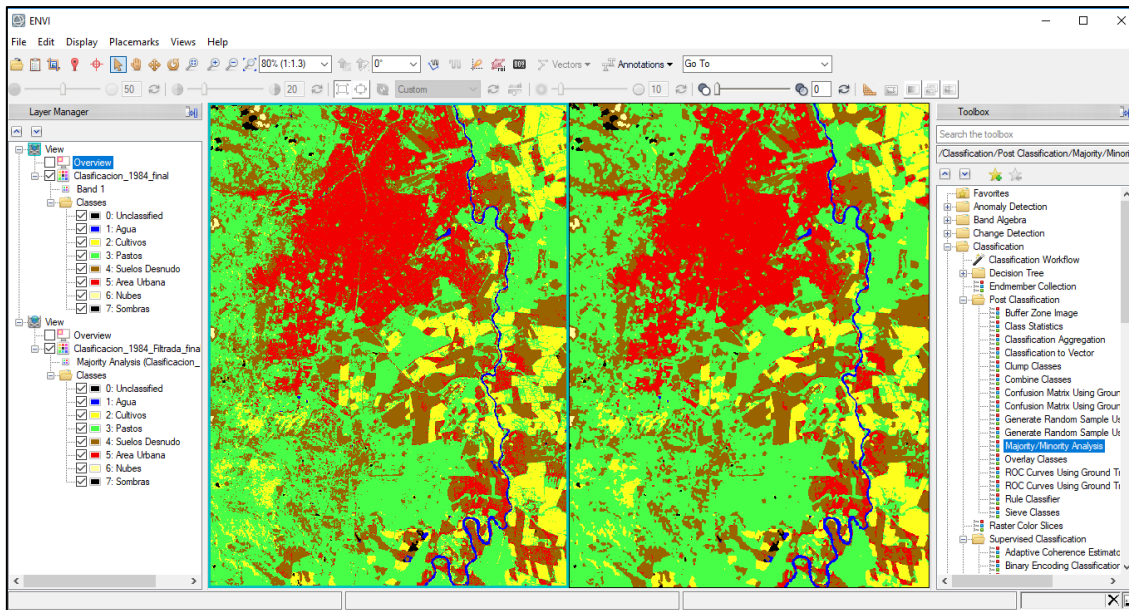
**Figura 19** Comparación imagen clasificada y post-clasificado con filtro. Año 2015



**Figura 20** Comparación imagen clasificada y post-clasificado con filtro. Año 2000

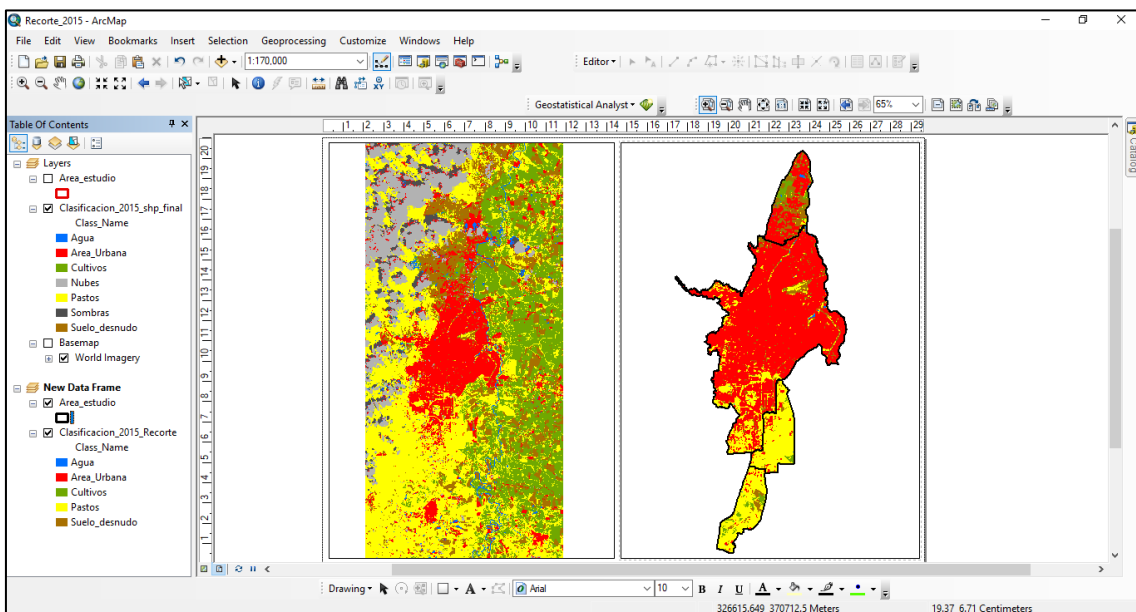


**Figura 21** Comparación imagen clasificada y post-clasificado con filtro. Año 1984



Posterior a la etapa de post-clasificación se realiza la conversión del formato raster a vector de las imágenes clasificadas a formato shapefile compatible con la plataforma ArcGis 10.5. A su vez se realiza el recorte del área de estudio comprendido en el área urbana, la zona de expansión y los corredores metropolitanos de la zona Norte y Sur de Cali (figura 17).

**Figura 22** Recorte del Área de estudio, año 2015



## 5.6 Variabilidad de las coberturas

A través de la plataforma ArcGis 10.5 se estableció la dinámica de los cambios ocurridos entre las coberturas, comparando los años 1984 a 2000, 2000 a 2015 y 1984 a 2015, para lo cual se realizó la intersección de las clasificaciones permitiendo crear una nueva capa de información para cuantificar y espacializar gráficamente las zonas expuestas a cambios entre los años contrastados.

Para crear esta información y estimar el área de la transición de las coberturas se utilizó la función de intersección que se encuentra en la caja de herramientas de ArcMap en donde se realizó la superposición de las clasificaciones en formato shapefile, paralelamente se requirió la construcción de una matriz de transición. La construcción de esta matriz se elaboró de acuerdo la metodología (Pontius, Shusas & McEachern, 2004), la cual parte del resultado obtenido en una matriz de tabulación cruzada en la que se sintetizan los datos consignados en la tabla de atributos del shapefile de clasificación de cada año, tomándose en cuenta el valor de área para cada cobertura, de manera que las columnas de la matriz representan de la fecha final, mientras las filas contienen las categorías de la fecha inicial, en consecuencia la diagonal principal representa los valores de área para coberturas estables entre las fechas, por otra parte, los valores por fuera de la diagonal indican la transición a otras categorías.

**Tabla 1** Esquema Matriz de tabulación cruzada

		Año 2				
Clase		Agua (1)	Área urbana (2)	Cultivos (3)	Pastos (4)	Suelo desnudo (5)
Año 1	Agua (1)	1-1	1-2	1-3	1-4	1-6
	Área urbana (2)	2-1	2-2	2-3	2-4	2-5
	Cultivos (3)	3-1	3-2	3-3	3-4	4-4
	Pastos (4)	4-1	4-2	4-3	4-4	4-5
	Suelo desnudo (5)	5-1	5-2	5-3	5-4	5-5

Posteriormente, se construye la matriz de transición con las columnas del Valor de área total por categoría para los años analizados, al igual que columnas Persistencia, Pérdidas, Ganancias, Intercambio, Cambio neto y Cambio Total con las que se calculan nuevos valores de cambio para las categorías.

Estas columnas en la tabla corresponde a:

Estable: Valores que persisten en el tiempo dentro de una misma categoría.

Pérdidas: Indica el valor de superficie que experimentó en pérdida neta por categoría i, entre fecha-1 y fecha-2, se calcula a partir de los valores de la Columna Total menos la persistencia de cada categoría.

**Ganancias:** Indica el valor de superficie que experimentó una ganancia neta por categoría. Se calcula con los valores de la fila total para la categoría j menos la persistencia.

**Intercambio:** Es el doble del valor mínimo de las ganancias o las pérdidas. En este cálculo cada celda de la retícula de pixeles que gana es apareada con cada celda que pierde para crear un par de celdas que se intercambian.

**Cambio Neto:** Es la diferencia en valor absoluto, entre las pérdidas y las ganancias de cada categoría. Se calculó del valor máximo de la ganancia y pérdida menos el mínimo de la ganancia y pérdida.

**Cambio Total:** Se calculó de la suma de las ganancias y las pérdidas.

Con base en los datos derivados de la matriz de transición fue posible calcular la tasa anual de cambio para la cobertura de área urbana, para ello se utilizó la ecuación de la FAO (1996).

Tasa de crecimiento

$$tasa = \left( \left( \frac{x_{t+1}}{x_t} \right)^{\frac{1}{t-m}} - 1 \right) * 100$$

Donde  $x_{t+1}$  son los datos del periodo (t+1) (año final) y  $x_t$  son los datos del periodo t (año inicial) y la potencia (1/t-m) es 1 sobre el número de periodos que hay entre  $x_t$  y  $x_{t+1}$ .

Considerando lo anterior se procedió a generar los mapas de cobertura para la zona de estudio, considerando en primera instancia la dinámica y valores de ocupación del suelo urbano durante el periodo de tiempo analizado.

## 5.7 Construcción de una base de almacenamiento

Para la administración de la información cartográfica generada, se procedió a crear un archivo Geodatabase, el cual es una colección de datasets geográficos de varios tipos contenida en una carpeta de sistema de archivos común, permite el almacenamiento físico de la información geográfica, de esta manera todos los datos vectoriales estarán organizados en una ubicación central para un fácil acceso y administración.

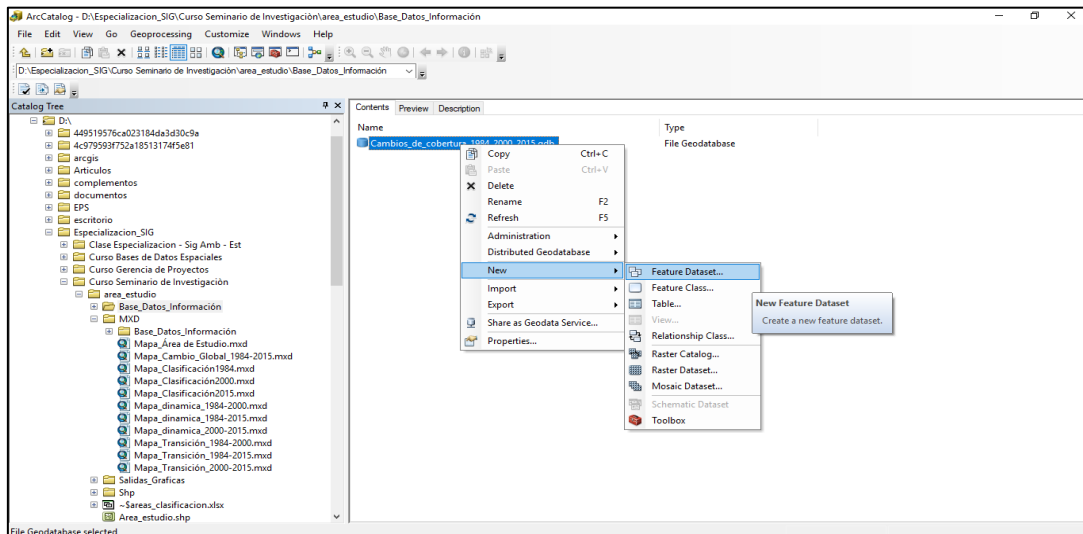
Paralelamente se creó la Topología, función que permite implementar condiciones y restricciones desde el punto de vista espacial y controlar la digitalización de las geometrías con base a una serie de condiciones impuestas de antemano, así se asegura la calidad de los datos geométricos, para este caso, al corresponder las coberturas a entidades tipo polígono se establecieron las condiciones de no sobreposición (Must not overlap) entre los polígonos (Coberturas) y que no deben existir vacíos (Must not have gats) entre estos.



A continuación se muestran los pasos metodológicos para crear la Geodatabase del estudio.

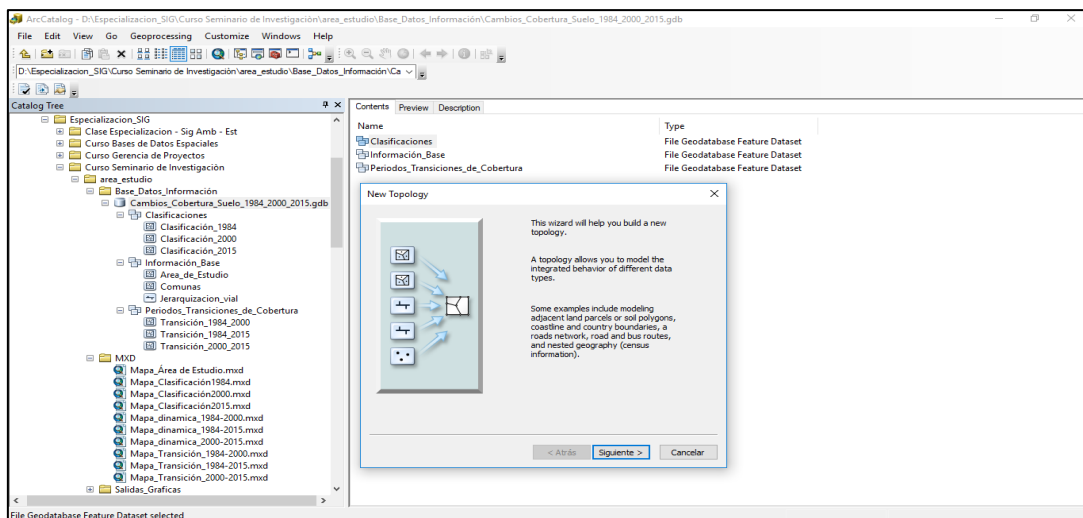
**Paso 1:** En ArcCatalog de ArcGis se selecciona la ruta de la carpeta asociada al proyecto, posterior a ello, dar clic derecho y seleccionar la opción File Geodatabase y dar nombre al archivo. Acto seguido crear los Datasets utilizados para generar una colección de clases de entidades relacionadas que comparten un sistema de coordenadas común. Luego se procede a importar las entidades relacionadas desde la ruta de origen (figura 20).

Figura 23 Creación de la Geodatabase

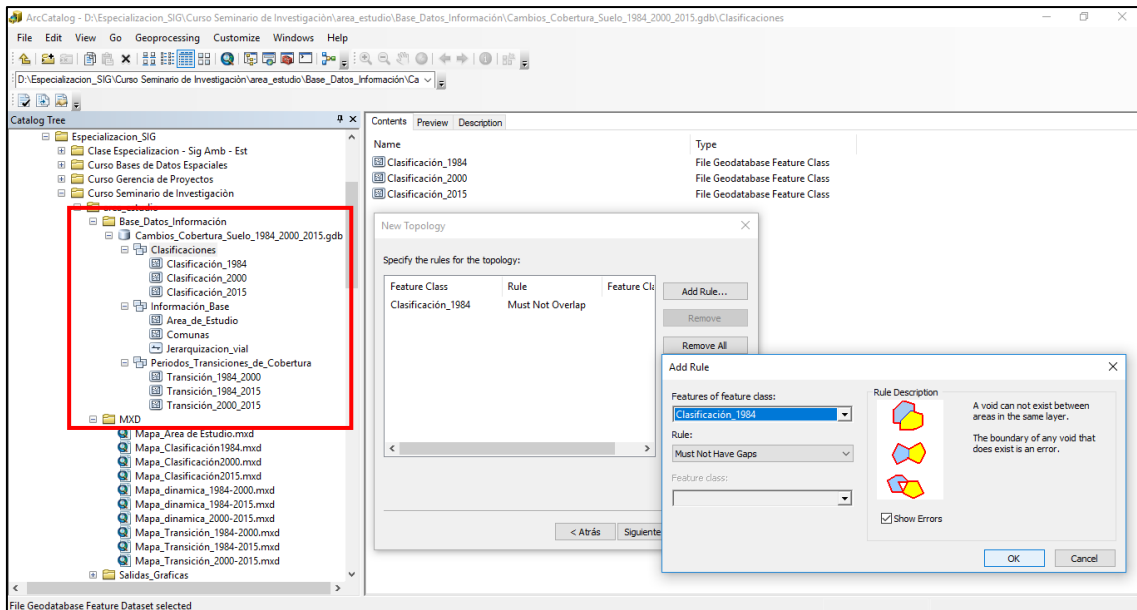


**Paso 2:** Al importar los archivos, se procede a crear la topología, para se da clic derecho sobre el dataset de interés, y se selecciona la opción New – Topology, se realiza ajustes de Nombre y tolerancia y se procede a seleccionar las reglas topológicas (Figuras 21 y 22).

Figura 24 Creando función de topología

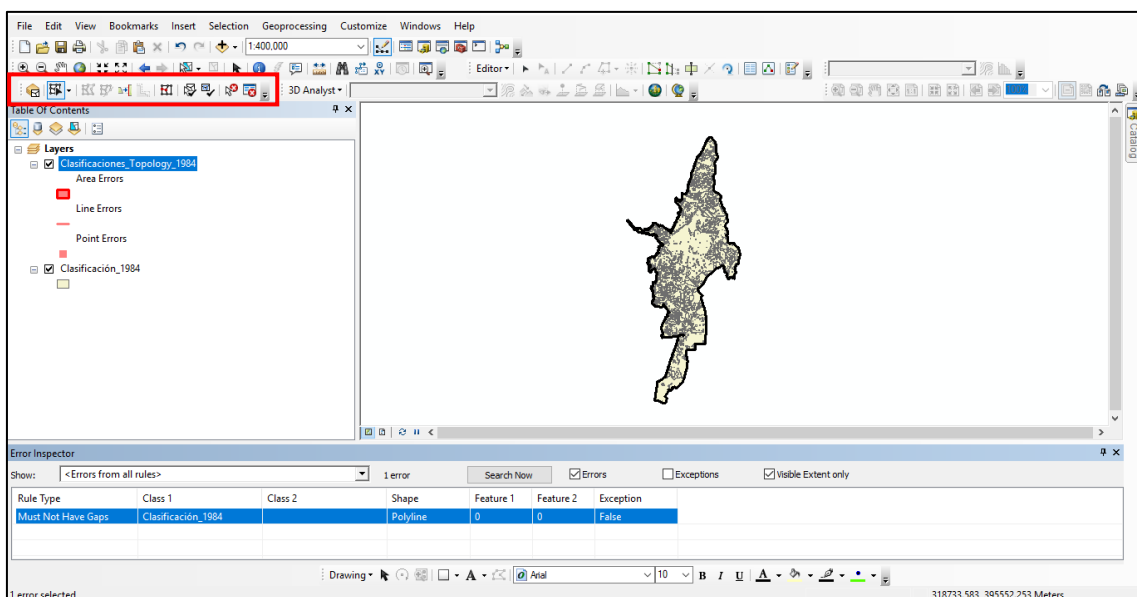


**Figura 25** Reglas Topológicas



**Paso 3:** Finalmente, a través de la aplicación central de ArcGis – ArcMap se cargan los archivos de topología creados, para habilitarlos deben activarse la extensión Topology y poner las capas en edición, de esta manera la barra de tareas de Topology se activa. Con la opción Validate Topology in current extent o Search Now se validan las reglas topológicas que fueron asignadas a las entidades, en caso de errores se procede a depurarlos mediante las herramientas de edición.

**Figura 26** Validación de topología ArcMap



## **6. Analisis de los resultados**

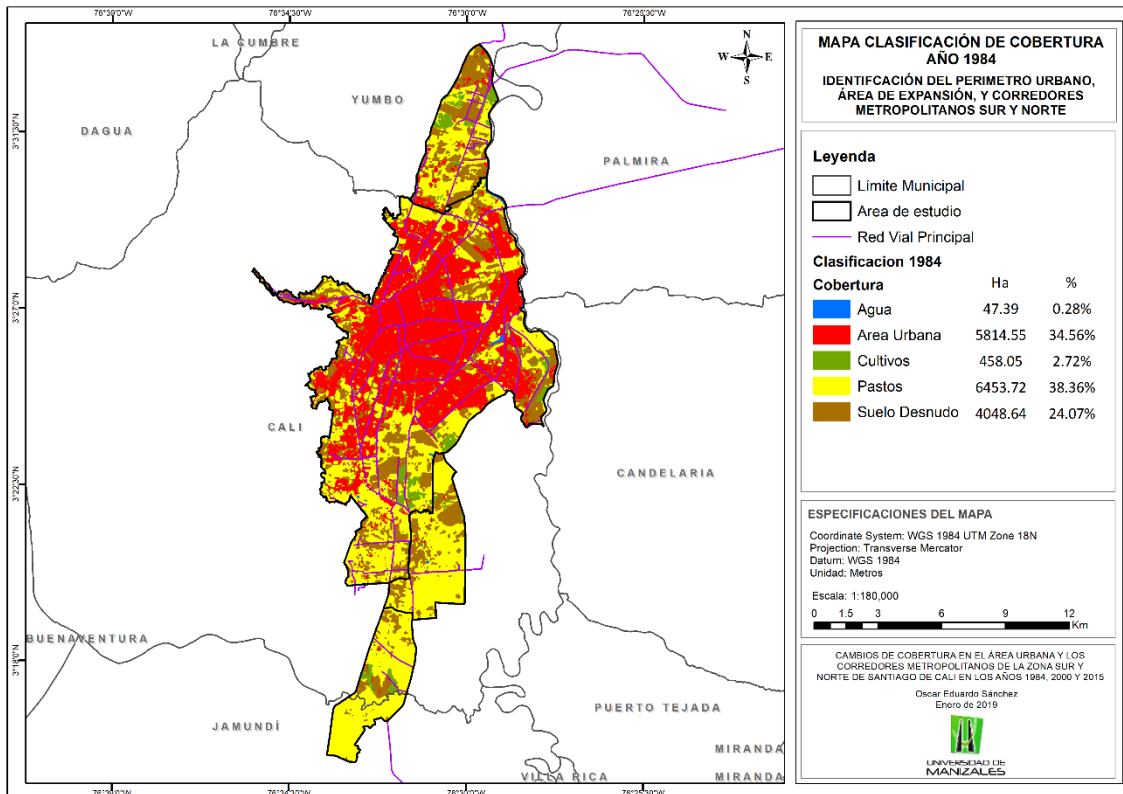
En este estudio, las clases o categorías de análisis definidas en la clasificación de las imágenes de satélite se determinaron principalmente, en función de las dinámicas o el proceso de expansión del suelo urbano y actividad agroindustrial en determinadas zonas, y por consiguiente su efecto en la disminución o pérdida cobertura vegetal resultado de la sustitución. Aplicado el proceso de filtrado y delimitación del área de estudio a las clasificaciones se desestimaron las clases nubes y sombras. Considerando lo anterior, dentro de la cartografía presentada a continuación se encuentra 5 clases que corresponden a Área Urbana, Cuerpos de agua, Cultivos, Pastos y Suelo desnudo.

### **6.1 Hallazgos clasificación año 1984**

Según datos históricos del Censo DANE, la población de Santiago de Cali para el año 1984 era de 1359834 habitantes, en ese momento no presentaba los problemas de disponibilidad para oferta de vivienda y otras actividades complementarios en el área urbana como se puede evidencia a continuación. La clasificación por cobertura obtenida para el área de estudio cuantifica para el año 1984 en extensión de suelo urbano 5814,5 hectáreas, equivalentes al 34,5% del área total, esta cobertura se extiende principalmente sobre el perímetro urbano y en una proporción muy pequeña en sectores del corredor Cali – Yumbo. De las 11919,44 Ha que conforman el perímetro urbano 47,62% (5676,62 Ha) corresponden a suelo urbano.

La cobertura que predomina en este año son los pastos con 6453,72 ha (38%), comprendiendo ampliamente sectores del corredor Cali-Yumbo, y hacia el sur, agrupando la zona de expansión que para ese momento no tendría la condición de esa figura normativa y el corredor Cali – Jamundí. El Suelo desnudo ocupa el tercer lugar con 4048,64 Ha (24,07%) localizándose de forma dispersa en el territorio. En cuarto lugar se encuentran los Cultivos, presentes en el corredor Cali – Yumbo y hacia el sur la ciudad, la menor proporción es para la cobertura Agua con 47,39 Ha (0,28%), representada por algunos cuerpos de agua y un segmento del Río Cauca que define el límite oriental de la ciudad (Ver mapa 2).

**Mapa 2** Clasificación de cobertura año 1984



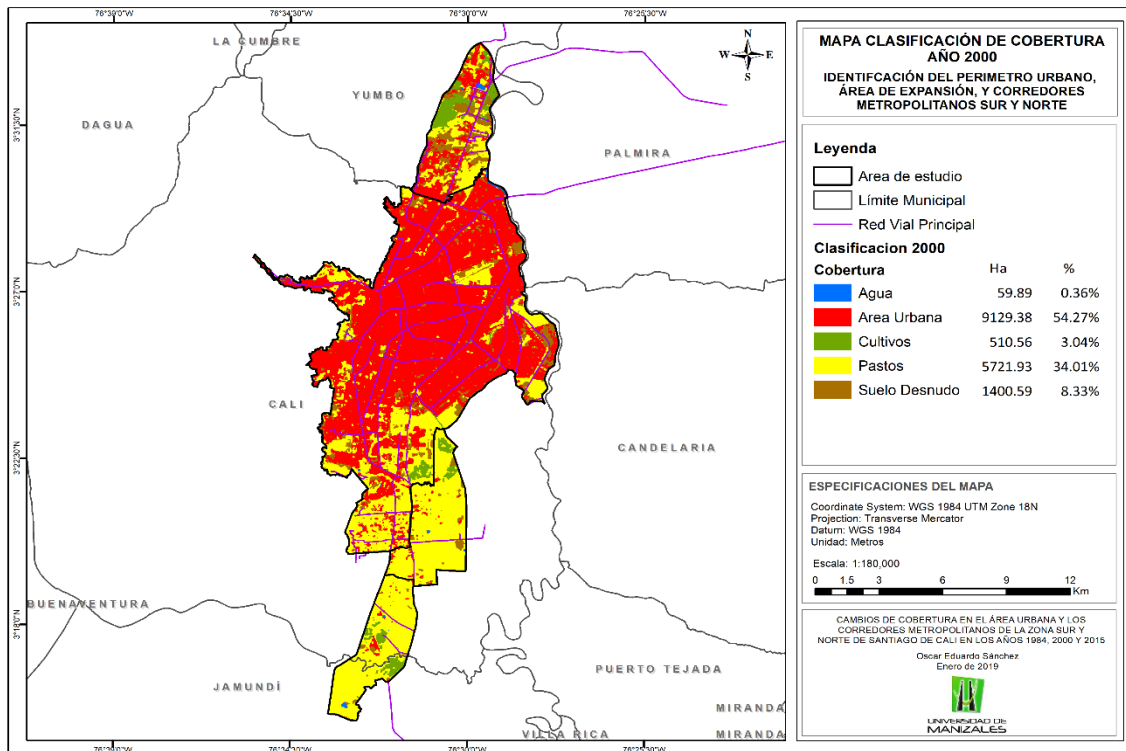
## 6.2 Hallazgos clasificación año 2000

De acuerdo con las proyecciones el censo DANE para el año 2000, Santiago de Cali contaba con 2161130 Habitantes, viéndose reflejado este incremento también en la configuración urbana con la saturación de algunos sectores de la ciudad comparado a 1984, es así como el 71,28% (8497,04 Ha) del perímetro urbano corresponde a la clase área urbana. Para el año 2000, la clasificación presenta un cambio sustancial con respecto a la predominancia de la cobertura en el territorio, es así como la clase Área Urbana con 9129,38 Ha que corresponde al 54,27% del área total pasa a ser la de mayor predominio, notándose una creciente urbanización en todos los sectores dentro perímetro urbano, especialmente hacia el Oriente y Occidente como resultado en gran medida de la configuración de asentamientos subnormales sobre estos sectores. Asimismo, continúa con la concentración de grandes construcciones hacia el norte sobre el corredor Cali – Yumbo y en menor proporción en la zona de expansión declarada como tal en el POT del mismo año, lo que dio origen desde ese momento a la oferta de proyectos de vivienda.

En segundo lugar se encuentran las áreas de Pastos con 5721,93 Ha (34,01%), el suelo desnudo con 1400,59 Ha (8,33%) se encuentra en tercer lugar, y la zona de cultivos con 510 Ha (3,04%) en cuarto lugar, extendiéndose principalmente

en el norte y sur del área de estudio. Finalmente, la cobertura Agua continua en el quinto lugar con 59.89 Ha (0,36%) (Ver mapa 3).

**Mapa 3** Clasificación de cobertura año 2000



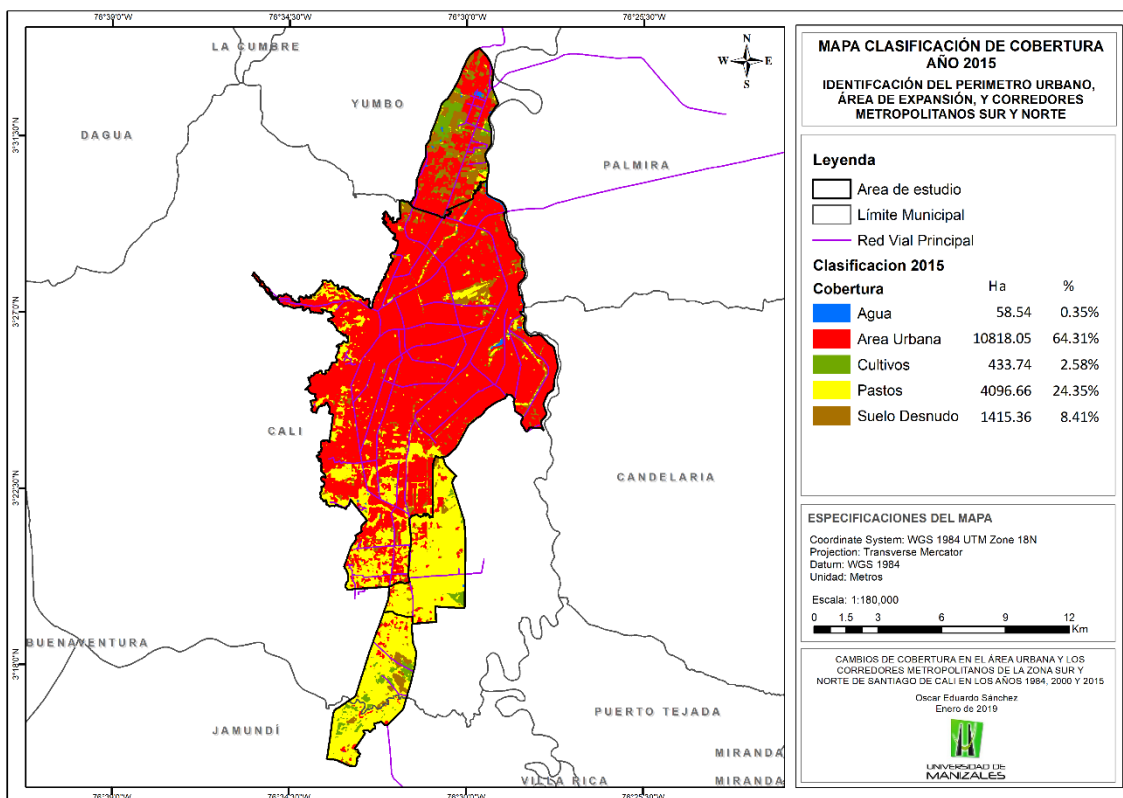
### 6.3 Hallazgos clasificación año 2015

La población del año 2015 estimada por las proyecciones del censo DANE del año 2005, establecen para Santiago de Cali 2369829 habitantes, siendo notable la sustracción de áreas de vegetación para la expansión del Área urbana de manera espontánea y sin control hasta los límites del perímetro urbano, solo hacia el sur se siguen conservando áreas de vegetación. Para el año 2015, el suelo urbano dentro del perímetro urbano corresponde al 81,35% (9698,98 Ha) del área total, quedando algunos sectores de Pastos que se asocian a la riberia del Río Cali, al occidentes por la localización de los cerros tutelares y en el sur de la ciudad. (Ver mapa 4).

La clasificación del año 2015, sigue la misma tendencia del patrón de ocupación presentado en el año 2000, como es de esperarse continua el predominio de cobertura de Área urbana, la cual presenta para ese año 10818,05 Ha que equivalen al 64,31% del área total, este aumento corresponde a una mayor densificación de la construcciones al interior del perímetro urbano en sectores ya consolidados y la aparición de nuevas construcciones hacia el sur, así como a causa de la creciente propuesta de proyectos de vivienda y la oferta

institucional sobre la zona de expansión y el corredor Cali – Jamundí contemplados en la norma de urbanísticas de la ciudad ante la saturación del perímetro urbano, de igual manera sobre el corredor Cali - Yumbo se sigue consolidando el emplazamiento de construcciones de tipo industrial. Continua en segundo lugar, desde muy lejos en términos de cobertura los Pastos con 4096,66 Ha (24,35%), siendo notorio la perdida de esta cobertura al interior del perímetro urbano y casi por completo en el corredor Cali-Yumbo. En tercer lugar se encuentra el Suelo desnudo con un valor estable, al contabilizar 1415,36 Ha (8,41%), debe considerarse que en gran medida la presencia de esta cobertura corresponde a la preparación de suelos para la actividad agrícola, especialmente aquellos localizados sobre el corredor Cali-Yumbo y Cali-Jamundí dada la configuración de los trazados geométricos en los polígonos. Finalmente, la cobertura de Cultivos con 433,74 Ha (2,58%) continua su patrón de localización, al igual que el Agua con 58,54 Ha (0,35%).

**Mapa 4** Clasificación de cobertura año 2015



#### 6.4 Estimación de los cambios de cobertura años 1984 - 2000

La transición o cambios producidos entre las coberturas de los años 1984 - 2000 se resumen en la tabla 2 que se presenta a continuación, en ella se cuantifica el área para cada cobertura del año 1984 y su cruce con las presentadas en el año 2000, con lo que se exponen la variación de ocupación de cada cobertura.

Tomando los valores por separado, el Suelo Urbano fue la cobertura que presentó la mayor estabilidad con el 97% (5691,68 Ha) con respecto al territorio ocupado en 1984, seguido de los Pastos con el 62% (3987,1 Ha) y Agua con el 60% (28,65 Ha), en su defecto los de menor estabilidad corresponden a los Cultivos y Suelo Desnudo, debe considerarse como se dijo anteriorme, el Suelo desnudo, especialmente el localizado por fuera del perímetro urbano corresponde en gran medida a zona de preparación para actividades agrícolas, por lo tanto se encuentra expuesto a una alta variabilidad de cobertura en el tiempo.

La tasa de crecimiento anual en este periodo de la clase Área urbana fue de 2.86%. Con respecto a las transiciones entre las coberturas, las mas significativas se presentan en favor de la categoría Área Urbana, siendo de gran importancia desde una perspectiva planificación y de procesos de urbanización, en este categoría se observa la ganancia de grandes superficies de Pastos y Suelo Desnudo sumando 3354,94 Ha, es decir, el 36,74% del área total urbana para el año 2000. También, es notorio las transiciones de importantes superficies de Pastos a Suelo desnudo y de Pastos a Cultivos en terminos de producción agrícola.

**Tabla 2** Matriz de Transición de clasificación de coberturas años 1984 y 2000, Valores en Hectáreas

Cobertura		2000					Total 1984
		Agua	Cultivos	Pastos	Suelo desnudo	Urbano	
1984	Agua	28.65	1.95	11.96	0.9	3.93	47.39
	Cultivos	2.43	127.39	173.99	75.42	78.82	458.05
	Pastos	17.76	247.13	3987.1	630.59	1571.14	6453.72
	Suelo desnudo	10.65	127.72	1508.24	618.23	1783.8	4048.64
	Urbano	0.4	6.39	40.63	75.45	5691.68	5814.55
<b>Total 2000</b>		59.89	510.58	5721.92	1400.59	9129.37	

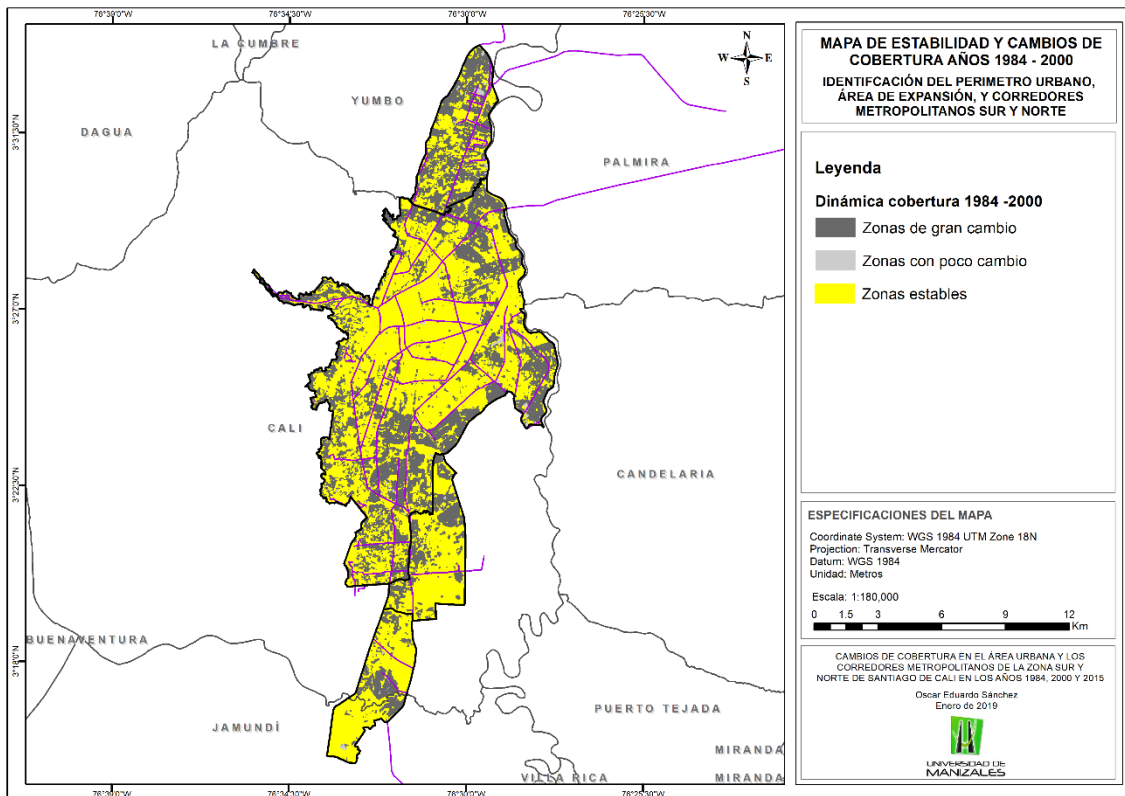
La siguiente tabla presenta un resumen de las dinámicas y cambios de las coberturas entre los años 1984 – 2000 de acuerdo a los valores obtenidos de la Matriz de transición. Al analizar los valores de área entre los años 1984 - 2000, se cuantifican 10453,05 Ha de cobertura estable total en la ocupación que equivalen al 62,13% del área de estudio, a su vez el cambio total fue del 37,86% (6369,30 Ha) con respecto a la clasificación inicial. Por su parte el intercambio total (doble valor del mínimo de pérdida o ganancia) fue del 35.53% (5978.92 Ha), y el Cambio neto total del 40.18% (6759,68) Ha (diferencia entre el mayor de ganancia y pérdida). Complementando la información anterior, los mapas 5 y 6 muestran la estabilidad y las transiciones para el periodo.



**Tabla 3** Resumen matriz de transición años 1984 y 2000 – Valores en hectáreas

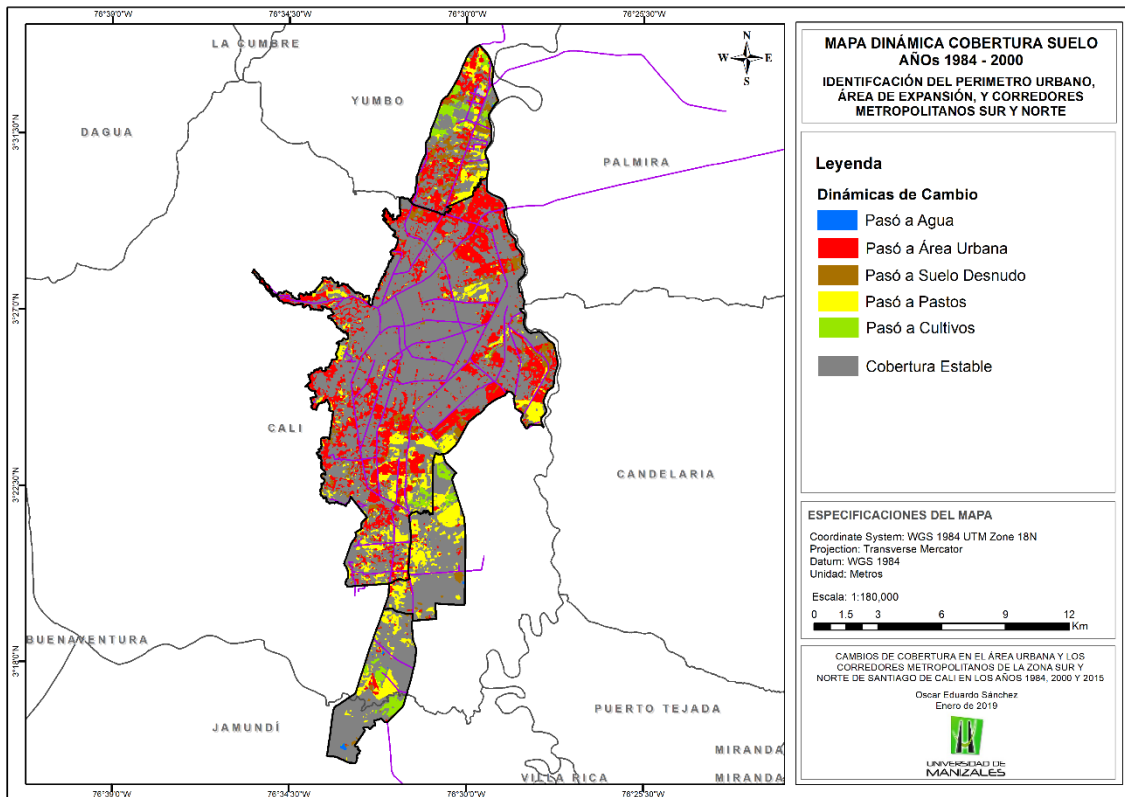
Cobertura	1984	2000	Estable	Ganancia	Perdida	Intercambio	Cambio Total	Cambio Neto
Agua	47.39	59.89	28.65	31.24	18.74	37.48	24.99	12.50
Cultivos	458.05	510.56	127.39	383.17	330.66	661.32	356.92	52.51
Pastos	6453.72	5721.93	3987.1	1734.83	2466.62	3469.66	2100.73	731.79
Suelo desnudo	4048.64	1400.59	618.23	782.36	3430.41	1564.72	2106.39	2648.05
Urbano	5814.55	9129.38	5691.68	3437.70	122.87	245.74	1780.29	3314.83
<b>Valores totales</b>	<b>16822.35</b>	<b>16822.35</b>	<b>10453.05</b>	<b>6369.30</b>	<b>6369.3</b>	<b>5978.92</b>	<b>6369.30</b>	<b>6759.68</b>

**Mapa 5** Estabilidad y cambios de cobertura periodo 1984 - 2000





**Mapa 6** Dinámica cobertura periodo 1984 – 2000 (transiciones)



### 6.5 Estimación de los cambios de cobertura años 2000 - 2015

Al analizar los datos consignados en la matriz de transición (tabla 4) para el periodo 2000 – 2015 se puede identificar que los principales hallazgos en la estabilidad de las coberturas, la presentó el Área Urbana con 8629,76 Ha que significan el 94,52% de la cobertura ocupada en el año 2000, seguidas de las áreas de Pastos con el 61,58% (3523.59 Ha) y Agua con 54,06% (32,38 Ha), una vez mas, las coberturas de Cultivos y Suelo Desnudo presentan poca estabilidad, presentando un área inferior al 30% de la cobertura que existía en el año 2000.

La tasa de crecimiento anual en este periodo de la clase Área urbana fue de 1,13%. Las transición entre las coberturas conservan el comportamiento del periodo anterior, por tanto, la cobertura Área urbana sigue incrementandose ocupando área de lo que fueron Pastos y Suelo desnudo, de manera que de las 10818.05 ha en la categoría de Área urbana, el 11,43% (1237,57) Ha pertenecían a Pastos y el 7,55% (817,28) Ha a Suelo desnudo, a su vez, las mayores pérdidas las presenta la cobertura de Pastos, pues además de zona convertidas en suelo urbano, 223,38 Ha pasaron a Cultivos y 720,04 Ha a Suelo desnudo, lo que supone la habilitación de nuevas superficies para la actividad agrícola.

**Tabla 4** Matriz de Transición de clasificación de coberturas años 2000 y 2015, Valores en Hectáreas

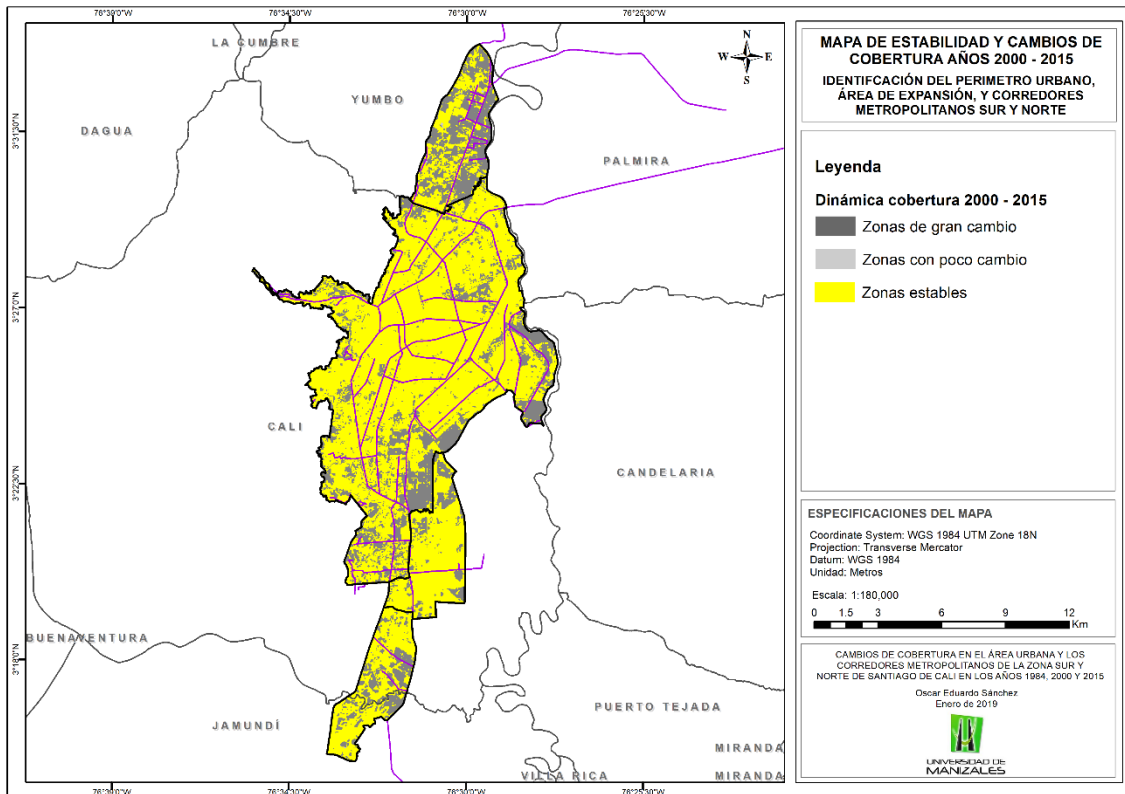
Cobertura		2015					Total 2000
		Agua	Cultivos	Pastos	Suelo desnudo	Urbano	
2000	Agua	32.38	3.48	5.73	2.64	15.66	59.89
	Cultivos	3.64	127.23	168.46	93.41	117.82	510.56
	Pastos	17.35	223.38	3523.59	720.04	1237.57	5721.93
	Suelo desnudo	2.07	58.71	176.34	346.19	817.28	1400.59
	Urbano	3.12	20.9	222.53	253.07	8629.76	9129.38
<b>Total 2015</b>		58.56	433.7	4096.65	1415.35	10818.09	

En la tabla 5 se presenta el resumen de los hallazgos de la matriz de transición y los cambios ocurridos para este periodo, conforme a esos valores se identifica que el área de estudio presenta un 75,25% (12659.20 Ha) de estabilidad en las coberturas del año 2015 con respecto a las presentadas en el 2000, a su vez el cambio total fue del 24,75% (4163.20 Ha), el intercambio total (doble valor de mínimo de pérdida o ganancia) del 29.24% (4919.52 Ha), y presentó un cambio de neto total (diferencia entre el mayor de ganancia y pérdida) del 18.11% (3046.88 Ha). Los mapas 7 y 8 muestran la estabilidad y el comportamiento de las dinámicas reflejadas en las transiciones de las coberturas para el periodo.

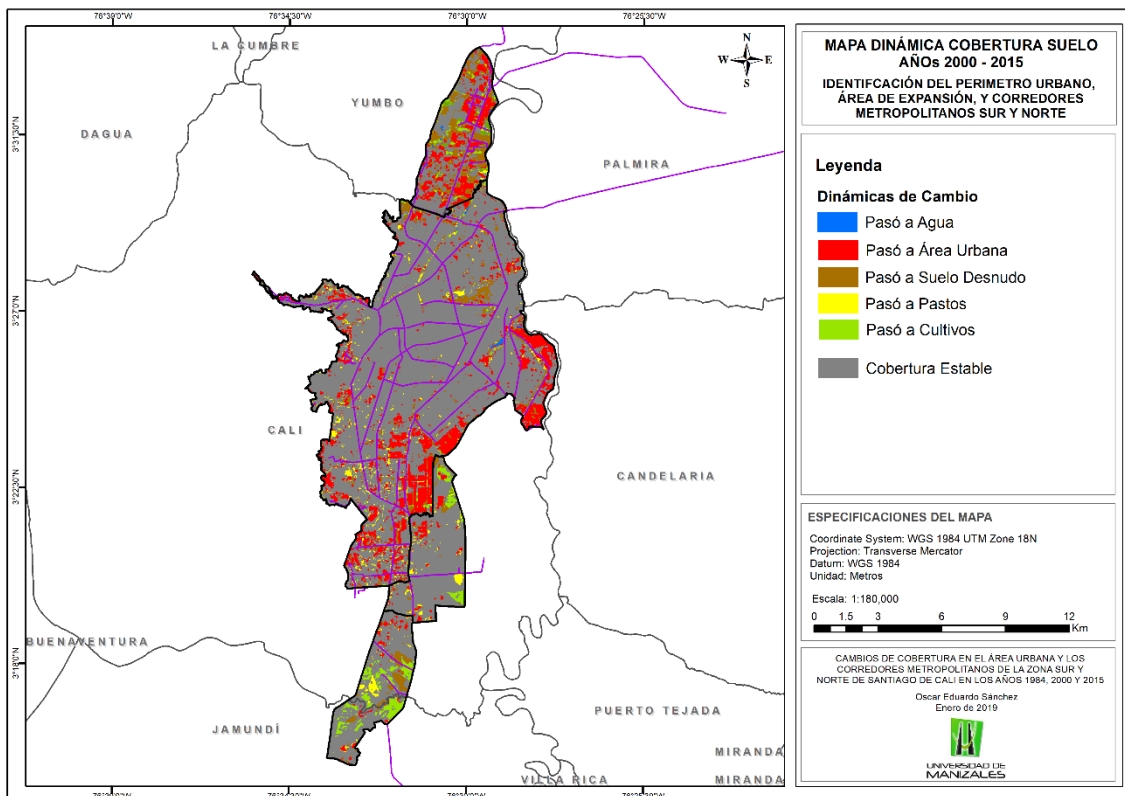
**Tabla 5** Resumen matriz de transición años 2000 y 2015 - Valores en hectáreas

Cobertura	2000	2015	Estable	Ganancia	Perdida	Intercambio	Cambio Total	Cambio Neto
Agua	59.89	58.54	32.38	26.16	27.51	52.32	26.84	1.35
Cultivos	510.56	433.74	127.23	306.51	383.33	613.02	344.92	76.82
Pastos	5721.93	4096.66	3523.59	573.07	2198.34	1146.14	1385.71	1625.27
Suelo desnudo	1400.59	1415.36	346.19	1069.17	1054.4	2108.8	1061.79	14.77
Urbano	9129.38	10818.05	8629.76	2188.29	499.62	999.24	1343.96	1688.67
<b>Valores totales</b>	16822.35	16822.35	12659.2	4163.20	4163.2	4919.52	4163.20	3406.88

**Mapa 7** Estabilidad y cambios de cobertura periodo 2000 - 2015



**Mapa 8** Dinámica cobertura periodo 2000 – 2015 (transiciones)



## 6.6 Estimación de los cambios de cobertura años 1984 -2015

El periodo 1984 -2015 el más extenso, abarca un margen de 31 años, para analizar las transiciones entre las coberturas, en la siguiente tabla se muestran los valores totales de ocupación para cada clase. En terminos absolutos, el Área urbana en 1984 era de 5814,55 Ha, y para el año 2015 de 10818,04 Ha, de las cuales el 98.25% (5715,83 Ha) han permanecido estables estables, siendo la cobertura de mayor persistencia, le siguen los cuerpos de Agua con 61.48% (29.14 Ha), los Pastos con el 45.81% (2957,53 Ha), por otra lado, la menor estabilidad es para la cobertura de Cultivos con 16.84% (77.15 Ha) y el Suelo desnudo con 13.64% (552,32 Ha).

La tasa de crecimiento anual en este periodo de la clase Área urbana fue de 4,22%. En lo referente a las transiciones entre las coberturas, como es de esperarse, las de mayor superficie se presentan en las clases de Pastos y Suelo desnudo hacia la clase Área urbana, es así, como de los 10818,04 Ha de Área urbana para el 2015, el 45,1% del área proviene de la ocupación de estas coberturas en el año 1984, de las cuales 2477,43 Ha pertenecian a Pastos y 2401.66 Ha a Suelo desnudo, siendo la mas significa en terminos ambientales la transición de Pastos a Área urbana, estas transiciones se expresan en un patron de ocupación que se expande al interior del perimetro urbano y en los corredores metropolitanos. Otras transiciones significativas son de la clase Cultivos a Área urbana en un 46,77% (214,23 Ha), Pastos a Suelo desnudo en un 11,52% (744,03 Ha), y de Suelo desnudo a Pastos en un 24,56% (994.37).

**Tabla 6** Matriz de Transición de clasificación de coberturas años 1984 y 2015, Valores en Hectáreas

Cobertura		2015					Total 1984
		Agua	Cultivos	Pastos	Suelo desnudo	Urbano	
1984	Agua	29.14	1.76	3.32	1.28	11.89	47.39
	Cultivos	2.82	77.15	100.15	63.7	214.23	458.05
	Pastos	16.6	258.33	2957.33	744.03	2477.43	6453.72
	Suelo desnudo	9.9	90.39	994.37	552.32	2401.66	4048.64
	Urbano	0.1	6.1	41.49	54.03	5712.83	5814.55
<b>Total 2015</b>		58.56	433.73	4096.66	1415.36	10818.04	

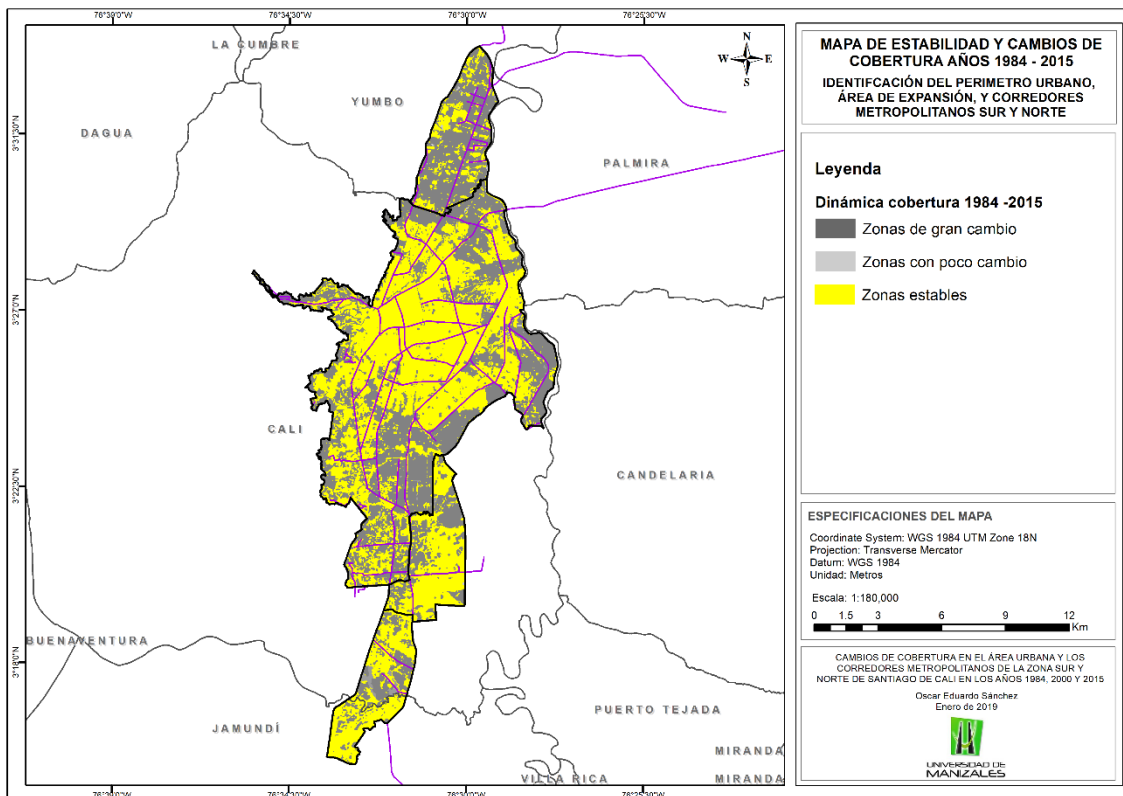
La confrontación de información temática en el periodo 1984 - 2015 (Figura...) se presenta en la tabla resumen de la matriz de transición, en la cual se observa que la zona de estudio presentó el 55.45% (9328.77) de estabilidad entre las clases de cobertura, el cambio total (mitad de la sumatoria de perdida y ganancia) fue de 45,55% (7493,58 Ha). En complemento,el intercambio total (doble valor de minimo de perdida o ganancia) equivale al 29,46% (4957,86 Ha)

y el cambio de neto total (diferencia entre el mayor de ganancia y pérdida) al 60.61% (10029.30 Ha). Además de los valores consignados en las tablas, en los mapas 9 y 10 se muestran geográficamente la estabilidad y las transiciones de las coberturas en el periodo analizado.

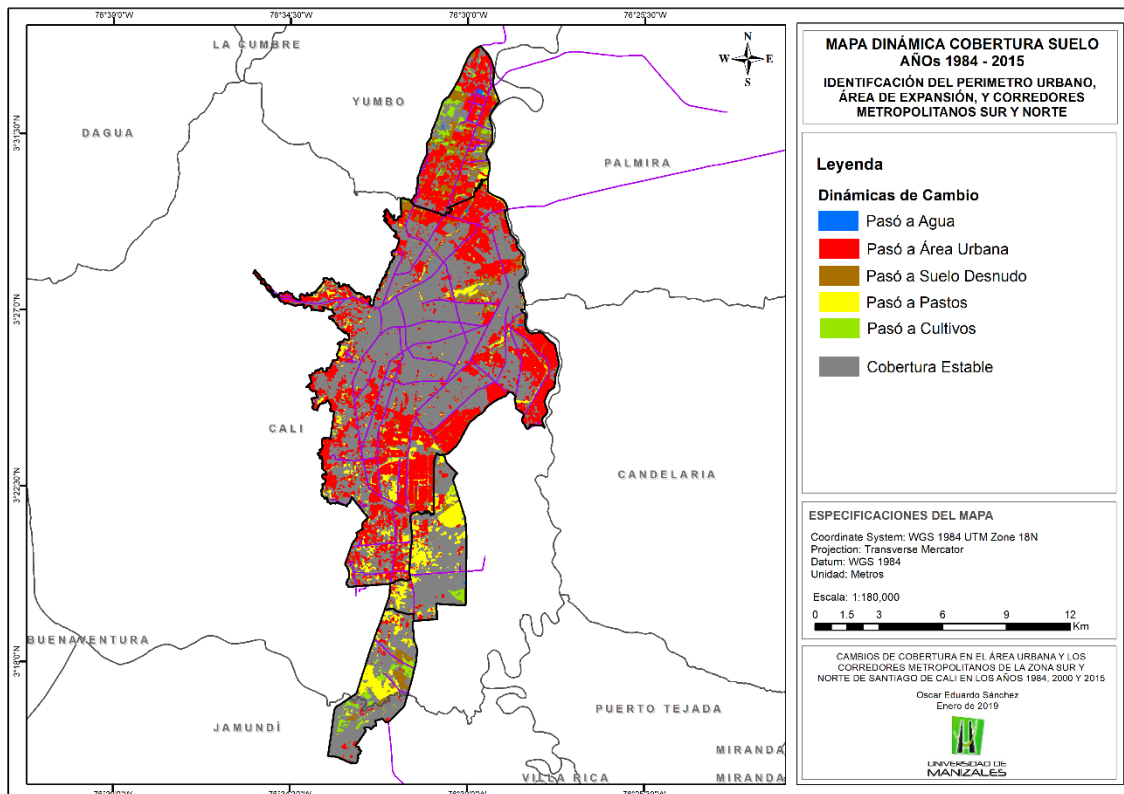
**Tabla 7** Resumen matriz de transición años 1984 y 2015- Valores en hectáreas

Cobertura	2000	2015	Estable	Ganancia	Perdida	Intercambio	Cambio Total	Cambio Neto
Agua	47.39	58.54	29.14	29.40	18.25	36.5	23.83	11.15
Cultivos	458.05	433.74	77.15	356.59	380.9	713.18	368.75	24.31
Pastos	6453.72	4096.66	2957.33	1139.33	3496.39	2278.66	2317.86	2357.06
Suelo desnudo	4048.64	1415.36	552.32	863.04	3496.32	1726.08	2179.68	2633.28
Urbano	5814.55	10818.05	5712.83	5105.22	101.72	203.44	2603.47	5003.50
<b>Valores totales</b>	<b>16822.35</b>	<b>16822.35</b>	<b>9328.77</b>	<b>7493.58</b>	<b>7493.58</b>	<b>4957.86</b>	<b>7493.58</b>	<b>10029.30</b>

**Mapa 9** Estabilidad y cambios de cobertura periodo 1984 - 2015



**Mapa 10** Dinámica cobertura periodo 1984 - 2015 (transiciones)



### Cambio Global periodo analizado

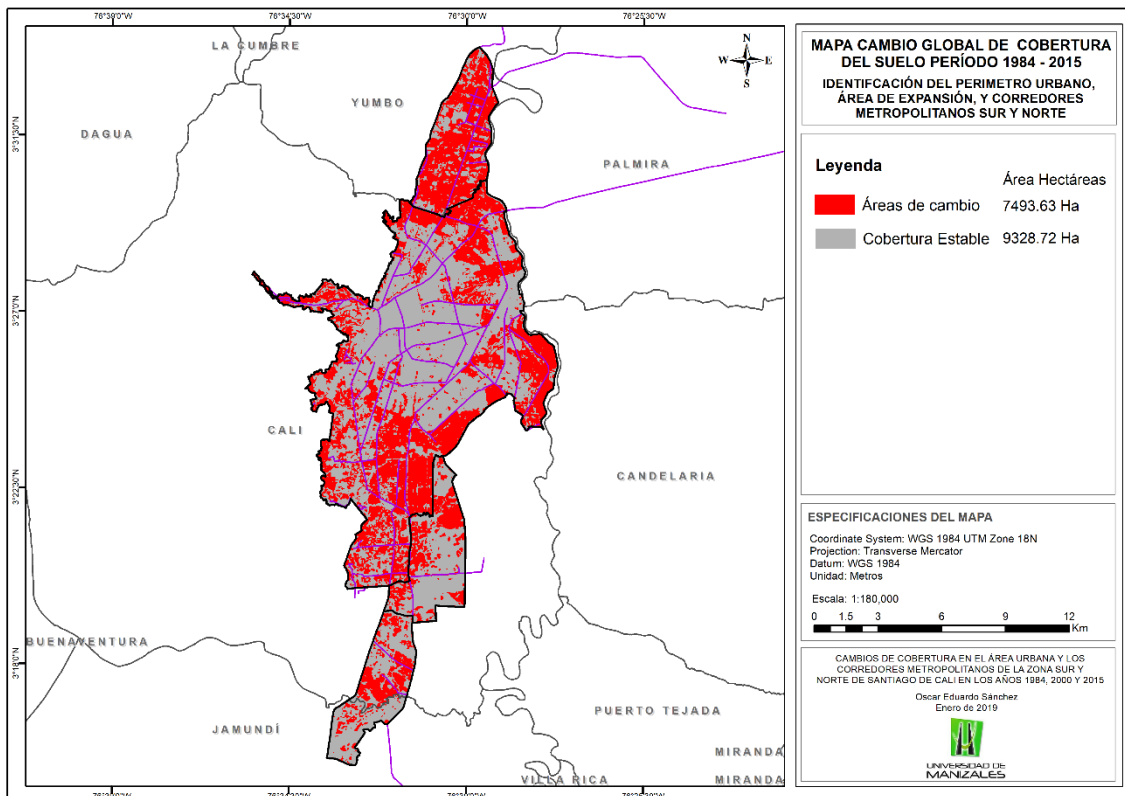
El mapa 11 presenta a modo de síntesis los cambios acontecidos en las coberturas durante el período analizado. Estos cambios corresponden a un total de 7493,63 Ha de las 16822,35 que conforman el área total, de acuerdo al análisis visual y soportado en los datos estadísticos, los cambios se presentaron al interior de todo el territorio, con mayor proporción al norte, sobre el corredor Cali – Yumbo con transiciones hacia área urbanas o construidas y pastos, en lo referente al interior del perímetro urbano los cambios se presentan desde el centro diseminándose hacia sus extremos, asociando estos cambios a transiciones hacia coberturas urbanas que se unen a la parte ya consolidada de la ciudad que permanecieron estables durante este periodo. En lo referente a zona de expansión y el corredor Cali – Jamundí, los cambios aun cuando son notables, estos suceden en menor proporción, obedeciendo a transiciones entre suelo desnudo y pastos, así como de pastos a área urbana dado por un crecimiento disperso sin ningún patrón espacial.

La información estadística extraída de la clasificación permite establecer al interior del perímetro urbano que el área construida para el final de periodo corresponde al 78% (9375,66 ha) del área total, a su vez la densificación es superior al 90% al interior de las comunas, exceptuando las localizadas al sur de la ciudad, correspondientes a barrios ocupados por población con los mayores



niveles de ingreso y donde existe la mayor concentración de parques y zonas verdes. De acuerdo con la estructura urbana reticular de Cali donde las zonas con mayor proporción de área construida aparecen en el centro, las que corresponden a los barrios del centro de administrativo y de servicios, y hacia el oriente, en el sector denominado distrito de Agua Blanca, donde se encuentran barrios “populares” con desarrollo no planificado y ocupado por población de muy bajos niveles de ingreso.

**Mapa 11** Cambio Global de Coberturas Período 1984 - 2015



## 7. CONCLUSIONES

El empleo de herramientas de Percepción Remota resulta sumamente importante en la aplicación y desarrollo de estudios sobre gestión del territorio pues a través de los análisis multitemporales además del seguimiento espacial a las coberturas y usos del suelo y las tendencias de ocupación, también se genera información estadística que brinda elementos de juicio sobre las políticas de desarrollo, las dinámicas sociales y económicas que intervienen en el territorio.

La construcción de esta base cartográfica y los datos estadísticos genera un aporte relevante para el desarrollo de nuevos estudios mediante el cruce con otras variables geográficas con los cuales realizar de una manera más acertada una caracterización sintética del territorio. No obstante, es necesario contrastar la información obtenida con datos de referencia o estudios similares para el área de estudio con fin el establecer la fidelidad de los resultados, dado que la aplicación de estos procedimientos implican un alto de compromiso sobre la manipulación de los datos y la generación de información.

De acuerdo con los resultados de este estudio, el perímetro urbano, la zona de expansión, y los corredores metropolitanos de la zona Norte y Sur de Santiago de Cali presentan un gran dinamismo en la ocupación del suelo durante el periodo analizado.

Paisajísticamente el suelo urbano fue la cobertura más constante y predominante, sustentado en el fuerte proceso de urbanización presentado en Cali desde las últimas de 2 décadas del siglo XX, pasando del 34,5% (5814,55 ha) en 1984 al 54,27% (9129,38 ha) en el 2000 y al 64,31%(10818,05 ha) para el 2015, lo que representa un incremento de 5003,50 ha del área urbana con respecto a 1984 y una tasa anual de crecimiento del 4,22%. Desde el año 2000 es notoria la alta densidad de área construida al interior del perímetro urbano, que luego se acentúa en el año 2015, identificando en la zona de expansión crecientes construcciones de áreas residenciales determinadas por las normas urbanísticas contempladas en el POT que condicionan la construcción. En lo que corresponde al corredor Cali – Jamundí la expansión urbana experimenta un crecimiento difuso en el que no se llega a identificar un patrón de continuidad espacial en los asentamientos, por otra parte en el corredor Cali – Yumbo se observa la consolidación de grandes construcciones a ambos lados del eje vial mezclados con usos agrícolas.

Es importante señalar que la cobertura de Agua representada principalmente por un segmento del cauce del Río Cauca y la laguna el Pondaje localizados al oriente de la ciudad, se mantuvieron estables pues no presentaron cambios físicos, significando valores alrededor del 0,3% del área total.

Con respecto a las transiciones de pérdida identificadas en la matriz de tabulación cruzada las más significativas fueron las presentadas en las



coberturas de Pastos y Suelo desnudo, las cuales corresponden en gran medida a las tendencias de ocupación del territorio, dado principalmente hacia el Área urbana construida y la conversión a zonas de cultivos para explotación agroindustrial de la caña de azúcar. Sin embargo en la actualidad es posible entender las áreas de cobertura de Pastos dentro de una lógica de expansión de la frontera agrícola y urbana teniendo una figura especulativa frente a las expectativas de consolidación de producción caña de azúcar y el mercado inmobiliario de gran auge hacia el sur de la ciudad y sobre el corredor Cali – Jamundí.

## 8. RECOMENDACIONES

Con miras a tener un diagnóstico más amplio y detallado del territorio en lo que lo refieren a las dinámicas de uso del suelo en Cali y su área metropolitana, es necesario estimular desde lo administrativo y lo académico estudios en pro de una planificación sostenible ambiental y socialmente, en la que no desconozcan las realidades territoriales que dan aparición a redes, vínculos y flujos como extensión de la vida urbana más allá de los límites administrativos. Se crea de esta manera un territorio cada vez más complejo, en el que se presenta un redimensionamiento de las actividades y las relaciones locales.

Con miras a consolidar el área de metropolitana de Cali en donde son permanentes las transformaciones sin continuidad espacial por causa de la aparición de espacios periurbanos dispersos, caso del corredor Cali-Jamundí, el proceso de metropolización requiere una planeación y administración integral del territorio, así como una eficiente coordinación intergubernamental e intersectorial tal como se contempla en la Ley 128 de 1994 marco normativo sobre este tema en el país, en el que además de contemplar el desarrollo integral del territorio desde una perspectiva ambiental se fijan disposiciones en términos del manejo de cobertura de servicios públicos, la ejecución de obras de interés metropolitano y la articulación con los planes de ordenamiento territorial municipal en donde se reconozca la heterogeneidad de usos del suelo, y el sometimiento a procesos mercantiles relacionados con la estimulación económica del precio de la tierra, como consecuencia de la incorporación real o potencial de suelos rurales a urbanos.

En complemento con lo anterior, también es pertinente que en Cali se contemple la apuesta por un programa de redensificación de la ciudad en sectores de consolidados pero deteriorados y con baja densidad poblacional, caso del centro de la ciudad y de algunos barrios tradicionales, con ello además se podría desarrollar nuevos espacios públicos para la ciudad en pro de mejorar la calidad de vida de los habitantes y dar solución a los problemas de asentamiento subnormales localizados al oriente en la zona de influencia del Río Cauca, y al occidentes en la zona de ladera.

En términos de profundidad de estudios complementarios, es preciso que para futuras clasificaciones de coberturas con mayor detalle y amplitud, se trabaje con imágenes de mayor resolución espacial que permitan una mayor identificación y diferenciación de las diversas coberturas presentes en esta zona, máxime cuando se trate estudios orientados a la valoración ambiental y de los recursos.

Desde una perspectiva institucional, se hace necesario adoptar este tipo de trabajos ya sea desde la academia o dentro de las administraciones municipales

para que dejen de ser objeto de proyectos específicos de financiación limitada, con ello se podrá realizar el monitoreo continuo del crecimiento urbano y los procesos de metropolización, así como involucrar variables asociadas al manejo de los recursos hídricos, la oferta ambiental, la gestión del riesgo y los aspectos socioeconómicos de la zona como lo es la capacidad agrícola. La puesta en marcha de esta herramienta no supone en un comienzo de grandes inversiones gracias a la variedad de programas, el fácil acceso y la gratuidad de la información disponible en la red. La complejidad la determinará el contenido, el carácter interdisciplinar y la periodicidad del seguimiento, lo cual podrá derivar en motivaciones para la búsqueda de objetivos más diversos y complejos.

## 9. ANEXOS

### 9.1 Metadata imagen 1984

```
GROUP = L1_METADATA_FILE
  GROUP = METADATA_FILE_INFO
    ORIGIN = "Image courtesy of the U.S. Geological Survey"
    REQUEST_ID = "0501702195719_16679"
    LANDSAT_SCENE_ID = "LT50090581984246AAA03"
    LANDSAT_PRODUCT_ID =
"LT05_L1TP_009058_19840902_20170220_01_T1"
    COLLECTION_NUMBER = 01
    FILE_DATE = 2017-02-20T04:37:14Z
    STATION_ID = "AAA"
    PROCESSING_SOFTWARE_VERSION = "LPGS_12.8.3"
    DATA_CATEGORY = "NOMINAL"
  END_GROUP = METADATA_FILE_INFO
  GROUP = PRODUCT_METADATA
    DATA_TYPE = "L1TP"
    DATA_TYPE_LORP = "TMR_LORP"
    COLLECTION_CATEGORY = "T1"
    ELEVATION_SOURCE = "GLS2000"
    OUTPUT_FORMAT = "GEOTIFF"
    EPHEMERIS_TYPE = "PREDICTIVE"
    SPACECRAFT_ID = "LANDSAT_5"
    SENSOR_ID = "TM"
    SENSOR_MODE = "SAM"
    WRS_PATH = 009
    WRS_ROW = 058
    DATE_ACQUIRED = 1984-09-02
    SCENE_CENTER_TIME = "14:49:23.3380310Z"
    CORNER_UL_LAT_PRODUCT = 3.86382
    CORNER_UL_LON_PRODUCT = -77.55177
    CORNER_UR_LAT_PRODUCT = 3.86754
    CORNER_UR_LON_PRODUCT = -75.45846
    CORNER_LL_LAT_PRODUCT = 1.99294
    CORNER_LL_LON_PRODUCT = -77.54753
    CORNER_LR_LAT_PRODUCT = 1.99486
    CORNER_LR_LON_PRODUCT = -75.45770
    CORNER_UL_PROJECTION_X_PRODUCT = 216600.000
    CORNER_UL_PROJECTION_Y_PRODUCT = 427500.000
    CORNER_UR_PROJECTION_X_PRODUCT = 449100.000
    CORNER_UR_PROJECTION_Y_PRODUCT = 427500.000
    CORNER_LL_PROJECTION_X_PRODUCT = 216600.000
    CORNER_LL_PROJECTION_Y_PRODUCT = 220500.000
    CORNER_LR_PROJECTION_X_PRODUCT = 449100.000
    CORNER_LR_PROJECTION_Y_PRODUCT = 220500.000
    REFLECTIVE_LINES = 6901
    REFLECTIVE_SAMPLES = 7751
    THERMAL_LINES = 6901
    THERMAL_SAMPLES = 7751
    FILE_NAME_BAND_1 =
"LT05_L1TP_009058_19840902_20170220_01_T1_B1.TIF"
```

```
FILE_NAME_BAND_2 =
"LT05_L1TP_009058_19840902_20170220_01_T1_B2.TIF"
FILE_NAME_BAND_3 =
"LT05_L1TP_009058_19840902_20170220_01_T1_B3.TIF"
FILE_NAME_BAND_4 =
"LT05_L1TP_009058_19840902_20170220_01_T1_B4.TIF"
FILE_NAME_BAND_5 =
"LT05_L1TP_009058_19840902_20170220_01_T1_B5.TIF"
FILE_NAME_BAND_6 =
"LT05_L1TP_009058_19840902_20170220_01_T1_B6.TIF"
FILE_NAME_BAND_7 =
"LT05_L1TP_009058_19840902_20170220_01_T1_B7.TIF"
FILE_NAME_BAND_QUALITY =
"LT05_L1TP_009058_19840902_20170220_01_T1_BQA.TIF"
GROUND_CONTROL_POINT_FILE_NAME =
"LT05_L1TP_009058_19840902_20170220_01_T1_GCP.txt"
ANGLE_COEFFICIENT_FILE_NAME =
"LT05_L1TP_009058_19840902_20170220_01_T1_ANG.txt"
REPORT_VERIFY_FILE_NAME =
"LT05_L1TP_009058_19840902_20170220_01_T1_VER.txt"
BROWSE_VERIFY_FILE_NAME =
"LT05_L1TP_009058_19840902_20170220_01_T1_VER.jpg"
METADATA_FILE_NAME =
"LT05_L1TP_009058_19840902_20170220_01_T1_MTL.txt"
CPF_NAME = "LT05CPF_19840701_19840930_01.03"
END_GROUP = PRODUCT_METADATA
GROUP = IMAGE_ATTRIBUTES
CLOUD_COVER = 43.00
CLOUD_COVER_LAND = 43.00
IMAGE_QUALITY = 9
SUN_AZIMUTH = 80.60065809
SUN_ELEVATION = 55.77741470
EARTH_SUN_DISTANCE = 1.0087547
SATURATION_BAND_1 = "Y"
SATURATION_BAND_2 = "Y"
SATURATION_BAND_3 = "Y"
SATURATION_BAND_4 = "Y"
SATURATION_BAND_5 = "Y"
SATURATION_BAND_6 = "N"
SATURATION_BAND_7 = "Y"
GROUND_CONTROL_POINTS_VERSION = 4
GROUND_CONTROL_POINTS_MODEL = 98
GEOMETRIC_RMSE_MODEL = 5.507
GEOMETRIC_RMSE_MODEL_Y = 4.742
GEOMETRIC_RMSE_MODEL_X = 2.801
GROUND_CONTROL_POINTS_VERIFY = 637
GEOMETRIC_RMSE_VERIFY = 0.174
GEOMETRIC_RMSE_VERIFY_QUAD_UL = 0.170
GEOMETRIC_RMSE_VERIFY_QUAD_UR = 0.195
GEOMETRIC_RMSE_VERIFY_QUAD_LL = 0.168
GEOMETRIC_RMSE_VERIFY_QUAD_LR = 0.198
END_GROUP = IMAGE_ATTRIBUTES
GROUP = MIN_MAX_RADIANCE
RADIANCE_MAXIMUM_BAND_1 = 169.000
```

```
RADIANCE_MINIMUM_BAND_1 = -1.520
RADIANCE_MAXIMUM_BAND_2 = 333.000
RADIANCE_MINIMUM_BAND_2 = -2.840
RADIANCE_MAXIMUM_BAND_3 = 264.000
RADIANCE_MINIMUM_BAND_3 = -1.170
RADIANCE_MAXIMUM_BAND_4 = 221.000
RADIANCE_MINIMUM_BAND_4 = -1.510
RADIANCE_MAXIMUM_BAND_5 = 30.200
RADIANCE_MINIMUM_BAND_5 = -0.370
RADIANCE_MAXIMUM_BAND_6 = 15.303
RADIANCE_MINIMUM_BAND_6 = 1.238
RADIANCE_MAXIMUM_BAND_7 = 16.500
RADIANCE_MINIMUM_BAND_7 = -0.150
END_GROUP = MIN_MAX_RADIANCE
GROUP = MIN_MAX_REFLECTANCE
REFLECTANCE_MAXIMUM_BAND_1 = 0.277915
REFLECTANCE_MINIMUM_BAND_1 = -0.002500
REFLECTANCE_MAXIMUM_BAND_2 = 0.605201
REFLECTANCE_MINIMUM_BAND_2 = -0.005161
REFLECTANCE_MAXIMUM_BAND_3 = 0.566420
REFLECTANCE_MINIMUM_BAND_3 = -0.002510
REFLECTANCE_MAXIMUM_BAND_4 = 0.683932
REFLECTANCE_MINIMUM_BAND_4 = -0.004673
REFLECTANCE_MAXIMUM_BAND_5 = 0.460614
REFLECTANCE_MINIMUM_BAND_5 = -0.005643
REFLECTANCE_MAXIMUM_BAND_7 = 0.641390
REFLECTANCE_MINIMUM_BAND_7 = -0.005831
END_GROUP = MIN_MAX_REFLECTANCE
GROUP = MIN_MAX_PIXEL_VALUE
QUANTIZE_CAL_MAX_BAND_1 = 255
QUANTIZE_CAL_MIN_BAND_1 = 1
QUANTIZE_CAL_MAX_BAND_2 = 255
QUANTIZE_CAL_MIN_BAND_2 = 1
QUANTIZE_CAL_MAX_BAND_3 = 255
QUANTIZE_CAL_MIN_BAND_3 = 1
QUANTIZE_CAL_MAX_BAND_4 = 255
QUANTIZE_CAL_MIN_BAND_4 = 1
QUANTIZE_CAL_MAX_BAND_5 = 255
QUANTIZE_CAL_MIN_BAND_5 = 1
QUANTIZE_CAL_MAX_BAND_6 = 255
QUANTIZE_CAL_MIN_BAND_6 = 1
QUANTIZE_CAL_MAX_BAND_7 = 255
QUANTIZE_CAL_MIN_BAND_7 = 1
END_GROUP = MIN_MAX_PIXEL_VALUE
GROUP = PRODUCT_PARAMETERS
CORRECTION_GAIN_BAND_1 = "CPF"
CORRECTION_GAIN_BAND_2 = "CPF"
CORRECTION_GAIN_BAND_3 = "CPF"
CORRECTION_GAIN_BAND_4 = "CPF"
CORRECTION_GAIN_BAND_5 = "CPF"
CORRECTION_GAIN_BAND_6 = "INTERNAL_CALIBRATION"
CORRECTION_GAIN_BAND_7 = "CPF"
CORRECTION_BIAS_BAND_1 = "CPF"
CORRECTION_BIAS_BAND_2 = "CPF"
```

```
CORRECTION_BIAS_BAND_3 = "CPF"  
CORRECTION_BIAS_BAND_4 = "CPF"  
CORRECTION_BIAS_BAND_5 = "CPF"  
CORRECTION_BIAS_BAND_6 = "CPF"  
CORRECTION_BIAS_BAND_7 = "CPF"  
END_GROUP = PRODUCT_PARAMETERS  
GROUP = RADIOMETRIC_RESCALING  
RADIANCE_MULT_BAND_1 = 6.7134E-01  
RADIANCE_MULT_BAND_2 = 1.3222E+00  
RADIANCE_MULT_BAND_3 = 1.0440E+00  
RADIANCE_MULT_BAND_4 = 8.7602E-01  
RADIANCE_MULT_BAND_5 = 1.2035E-01  
RADIANCE_MULT_BAND_6 = 5.5375E-02  
RADIANCE_MULT_BAND_7 = 6.5551E-02  
RADIANCE_ADD_BAND_1 = -2.19134  
RADIANCE_ADD_BAND_2 = -4.16220  
RADIANCE_ADD_BAND_3 = -2.21398  
RADIANCE_ADD_BAND_4 = -2.38602  
RADIANCE_ADD_BAND_5 = -0.49035  
RADIANCE_ADD_BAND_6 = 1.18243  
RADIANCE_ADD_BAND_7 = -0.21555  
REFLECTANCE_MULT_BAND_1 = 1.1040E-03  
REFLECTANCE_MULT_BAND_2 = 2.4030E-03  
REFLECTANCE_MULT_BAND_3 = 2.2399E-03  
REFLECTANCE_MULT_BAND_4 = 2.7110E-03  
REFLECTANCE_MULT_BAND_5 = 1.8357E-03  
REFLECTANCE_MULT_BAND_7 = 2.5481E-03  
REFLECTANCE_ADD_BAND_1 = -0.003604  
REFLECTANCE_ADD_BAND_2 = -0.007564  
REFLECTANCE_ADD_BAND_3 = -0.004750  
REFLECTANCE_ADD_BAND_4 = -0.007384  
REFLECTANCE_ADD_BAND_5 = -0.007479  
REFLECTANCE_ADD_BAND_7 = -0.008379  
END_GROUP = RADIOMETRIC_RESCALING  
GROUP = THERMAL_CONSTANTS  
K1_CONSTANT_BAND_6 = 607.76  
K2_CONSTANT_BAND_6 = 1260.56  
END_GROUP = THERMAL_CONSTANTS  
GROUP = PROJECTION_PARAMETERS  
MAP_PROJECTION = "UTM"  
DATUM = "WGS84"  
ELLIPSOID = "WGS84"  
UTM_ZONE = 18  
GRID_CELL_SIZE_REFLECTIVE = 30.00  
GRID_CELL_SIZE_THERMAL = 30.00  
ORIENTATION = "NORTH_UP"  
RESAMPLING_OPTION = "CUBIC_CONVOLUTION"  
MAP_PROJECTION_LORA = "NA"  
END_GROUP = PROJECTION_PARAMETERS  
END_GROUP = L1_METADATA_FILE  
END
```

## 9.2 Metadata imagen año 2000

```
GROUP = L1_METADATA_FILE
  GROUP = METADATA_FILE_INFO
    ORIGIN = "Image courtesy of the U.S. Geological Survey"
    REQUEST_ID = "0501612134578_01690"
    LANDSAT_SCENE_ID = "LT50090582000226XXX03"
    LANDSAT_PRODUCT_ID =
"LT05_L1TP_009058_20000813_20161214_01_T1"
    COLLECTION_NUMBER = 01
    FILE_DATE = 2016-12-14T11:53:00Z
    STATION_ID = "XXX"
    PROCESSING_SOFTWARE_VERSION = "LPGS_12.8.2"
    DATA_CATEGORY = "NOMINAL"
  END_GROUP = METADATA_FILE_INFO
  GROUP = PRODUCT_METADATA
    DATA_TYPE = "L1TP"
    DATA_TYPE_LORP = "TMR_LORP"
    COLLECTION_CATEGORY = "T1"
    ELEVATION_SOURCE = "GLS2000"
    OUTPUT_FORMAT = "GEOTIFF"
    EPHEMERIS_TYPE = "DEFINITIVE"
    SPACECRAFT_ID = "LANDSAT_5"
    SENSOR_ID = "TM"
    SENSOR_MODE = "SAM"
    WRS_PATH = 009
    WRS_ROW = 058
    DATE_ACQUIRED = 2000-08-13
    SCENE_CENTER_TIME = "14:56:54.9630060Z"
    CORNER_UL_LAT_PRODUCT = 3.85062
    CORNER_UL_LON_PRODUCT = -77.43025
    CORNER_UR_LAT_PRODUCT = 3.85403
    CORNER_UR_LON_PRODUCT = -75.33146
    CORNER_LL_LAT_PRODUCT = 1.94703
    CORNER_LL_LON_PRODUCT = -77.42619
    CORNER_LR_LAT_PRODUCT = 1.94875
    CORNER_LR_LON_PRODUCT = -75.33090
    CORNER_UL_PROJECTION_X_PRODUCT = 230100.000
    CORNER_UL_PROJECTION_Y_PRODUCT = 426000.000
    CORNER_UR_PROJECTION_X_PRODUCT = 463200.000
    CORNER_UR_PROJECTION_Y_PRODUCT = 426000.000
    CORNER_LL_PROJECTION_X_PRODUCT = 230100.000
    CORNER_LL_PROJECTION_Y_PRODUCT = 215400.000
    CORNER_LR_PROJECTION_X_PRODUCT = 463200.000
    CORNER_LR_PROJECTION_Y_PRODUCT = 215400.000
    REFLECTIVE_LINES = 7021
    REFLECTIVE_SAMPLES = 7771
    THERMAL_LINES = 7021
    THERMAL_SAMPLES = 7771
    FILE_NAME_BAND_1 =
"LT05_L1TP_009058_20000813_20161214_01_T1_B1.TIF"
    FILE_NAME_BAND_2 =
"LT05_L1TP_009058_20000813_20161214_01_T1_B2.TIF"
```



```
FILE_NAME_BAND_3 =  
"LT05_L1TP_009058_20000813_20161214_01_T1_B3.TIF"  
FILE_NAME_BAND_4 =  
"LT05_L1TP_009058_20000813_20161214_01_T1_B4.TIF"  
FILE_NAME_BAND_5 =  
"LT05_L1TP_009058_20000813_20161214_01_T1_B5.TIF"  
FILE_NAME_BAND_6 =  
"LT05_L1TP_009058_20000813_20161214_01_T1_B6.TIF"  
FILE_NAME_BAND_7 =  
"LT05_L1TP_009058_20000813_20161214_01_T1_B7.TIF"  
FILE_NAME_BAND_QUALITY =  
"LT05_L1TP_009058_20000813_20161214_01_T1_BQA.TIF"  
GROUND_CONTROL_POINT_FILE_NAME =  
"LT05_L1TP_009058_20000813_20161214_01_T1_GCP.txt"  
ANGLE_COEFFICIENT_FILE_NAME =  
"LT05_L1TP_009058_20000813_20161214_01_T1_ANG.txt"  
REPORT_VERIFY_FILE_NAME =  
"LT05_L1TP_009058_20000813_20161214_01_T1_VER.txt"  
BROWSE_VERIFY_FILE_NAME =  
"LT05_L1TP_009058_20000813_20161214_01_T1_VER.jpg"  
METADATA_FILE_NAME =  
"LT05_L1TP_009058_20000813_20161214_01_T1_MTL.txt"  
CPF_NAME = "LT05CPF_20000701_20000930_01.03"  
END_GROUP = PRODUCT_METADATA  
GROUP = IMAGE_ATTRIBUTES  
CLOUD_COVER = 50.00  
CLOUD_COVER_LAND = 50.00  
IMAGE_QUALITY = 9  
SUN_AZIMUTH = 68.65220959  
SUN_ELEVATION = 55.13925643  
EARTH_SUN_DISTANCE = 1.0130276  
SATURATION_BAND_1 = "Y"  
SATURATION_BAND_2 = "Y"  
SATURATION_BAND_3 = "Y"  
SATURATION_BAND_4 = "Y"  
SATURATION_BAND_5 = "Y"  
SATURATION_BAND_6 = "N"  
SATURATION_BAND_7 = "Y"  
GROUND_CONTROL_POINTS_VERSION = 4  
GROUND_CONTROL_POINTS_MODEL = 113  
GEOMETRIC_RMSE_MODEL = 3.901  
GEOMETRIC_RMSE_MODEL_Y = 3.056  
GEOMETRIC_RMSE_MODEL_X = 2.425  
GROUND_CONTROL_POINTS_VERIFY = 838  
GEOMETRIC_RMSE_VERIFY = 0.137  
GEOMETRIC_RMSE_VERIFY_QUAD_UL = 0.128  
GEOMETRIC_RMSE_VERIFY_QUAD_UR = 0.131  
GEOMETRIC_RMSE_VERIFY_QUAD_LL = 0.138  
GEOMETRIC_RMSE_VERIFY_QUAD_LR = 0.171  
END_GROUP = IMAGE_ATTRIBUTES  
GROUP = MIN_MAX_RADIANCE  
RADIANCE_MAXIMUM_BAND_1 = 193.000  
RADIANCE_MINIMUM_BAND_1 = -1.520  
RADIANCE_MAXIMUM_BAND_2 = 365.000
```

```
RADIANCE_MINIMUM_BAND_2 = -2.840
RADIANCE_MAXIMUM_BAND_3 = 264.000
RADIANCE_MINIMUM_BAND_3 = -1.170
RADIANCE_MAXIMUM_BAND_4 = 221.000
RADIANCE_MINIMUM_BAND_4 = -1.510
RADIANCE_MAXIMUM_BAND_5 = 30.200
RADIANCE_MINIMUM_BAND_5 = -0.370
RADIANCE_MAXIMUM_BAND_6 = 15.303
RADIANCE_MINIMUM_BAND_6 = 1.238
RADIANCE_MAXIMUM_BAND_7 = 16.500
RADIANCE_MINIMUM_BAND_7 = -0.150
END_GROUP = MIN_MAX_RADIANCE
GROUP = MIN_MAX_REFLECTANCE
REFLECTANCE_MAXIMUM_BAND_1 = 0.320076
REFLECTANCE_MINIMUM_BAND_1 = -0.002521
REFLECTANCE_MAXIMUM_BAND_2 = 0.668990
REFLECTANCE_MINIMUM_BAND_2 = -0.005205
REFLECTANCE_MAXIMUM_BAND_3 = 0.571229
REFLECTANCE_MINIMUM_BAND_3 = -0.002532
REFLECTANCE_MAXIMUM_BAND_4 = 0.689738
REFLECTANCE_MINIMUM_BAND_4 = -0.004713
REFLECTANCE_MAXIMUM_BAND_5 = 0.464524
REFLECTANCE_MINIMUM_BAND_5 = -0.005691
REFLECTANCE_MAXIMUM_BAND_7 = 0.646835
REFLECTANCE_MINIMUM_BAND_7 = -0.005880
END_GROUP = MIN_MAX_REFLECTANCE
GROUP = MIN_MAX_PIXEL_VALUE
QUANTIZE_CAL_MAX_BAND_1 = 255
QUANTIZE_CAL_MIN_BAND_1 = 1
QUANTIZE_CAL_MAX_BAND_2 = 255
QUANTIZE_CAL_MIN_BAND_2 = 1
QUANTIZE_CAL_MAX_BAND_3 = 255
QUANTIZE_CAL_MIN_BAND_3 = 1
QUANTIZE_CAL_MAX_BAND_4 = 255
QUANTIZE_CAL_MIN_BAND_4 = 1
QUANTIZE_CAL_MAX_BAND_5 = 255
QUANTIZE_CAL_MIN_BAND_5 = 1
QUANTIZE_CAL_MAX_BAND_6 = 255
QUANTIZE_CAL_MIN_BAND_6 = 1
QUANTIZE_CAL_MAX_BAND_7 = 255
QUANTIZE_CAL_MIN_BAND_7 = 1
END_GROUP = MIN_MAX_PIXEL_VALUE
GROUP = PRODUCT_PARAMETERS
CORRECTION_GAIN_BAND_1 = "CPF"
CORRECTION_GAIN_BAND_2 = "CPF"
CORRECTION_GAIN_BAND_3 = "CPF"
CORRECTION_GAIN_BAND_4 = "CPF"
CORRECTION_GAIN_BAND_5 = "CPF"
CORRECTION_GAIN_BAND_6 = "INTERNAL_CALIBRATION"
CORRECTION_GAIN_BAND_7 = "CPF"
CORRECTION_BIAS_BAND_1 = "CPF"
CORRECTION_BIAS_BAND_2 = "CPF"
CORRECTION_BIAS_BAND_3 = "CPF"
CORRECTION_BIAS_BAND_4 = "CPF"
```

```
CORRECTION_BIAS_BAND_5 = "CPF"  
CORRECTION_BIAS_BAND_6 = "CPF"  
CORRECTION_BIAS_BAND_7 = "CPF"  
END_GROUP = PRODUCT_PARAMETERS  
GROUP = RADIOMETRIC_RESCALING  
RADIANCE_MULT_BAND_1 = 7.6583E-01  
RADIANCE_MULT_BAND_2 = 1.4482E+00  
RADIANCE_MULT_BAND_3 = 1.0440E+00  
RADIANCE_MULT_BAND_4 = 8.7602E-01  
RADIANCE_MULT_BAND_5 = 1.2035E-01  
RADIANCE_MULT_BAND_6 = 5.5375E-02  
RADIANCE_MULT_BAND_7 = 6.5551E-02  
RADIANCE_ADD_BAND_1 = -2.28583  
RADIANCE_ADD_BAND_2 = -4.28819  
RADIANCE_ADD_BAND_3 = -2.21398  
RADIANCE_ADD_BAND_4 = -2.38602  
RADIANCE_ADD_BAND_5 = -0.49035  
RADIANCE_ADD_BAND_6 = 1.18243  
RADIANCE_ADD_BAND_7 = -0.21555  
REFLECTANCE_MULT_BAND_1 = 1.2701E-03  
REFLECTANCE_MULT_BAND_2 = 2.6543E-03  
REFLECTANCE_MULT_BAND_3 = 2.2589E-03  
REFLECTANCE_MULT_BAND_4 = 2.7341E-03  
REFLECTANCE_MULT_BAND_5 = 1.8512E-03  
REFLECTANCE_MULT_BAND_7 = 2.5697E-03  
REFLECTANCE_ADD_BAND_1 = -0.003791  
REFLECTANCE_ADD_BAND_2 = -0.007860  
REFLECTANCE_ADD_BAND_3 = -0.004790  
REFLECTANCE_ADD_BAND_4 = -0.007447  
REFLECTANCE_ADD_BAND_5 = -0.007542  
REFLECTANCE_ADD_BAND_7 = -0.008450  
END_GROUP = RADIOMETRIC_RESCALING  
GROUP = THERMAL_CONSTANTS  
K1_CONSTANT_BAND_6 = 607.76  
K2_CONSTANT_BAND_6 = 1260.56  
END_GROUP = THERMAL_CONSTANTS  
GROUP = PROJECTION_PARAMETERS  
MAP_PROJECTION = "UTM"  
DATUM = "WGS84"  
ELLIPSOID = "WGS84"  
UTM_ZONE = 18  
GRID_CELL_SIZE_REFLECTIVE = 30.00  
GRID_CELL_SIZE_THERMAL = 30.00  
ORIENTATION = "NORTH_UP"  
RESAMPLING_OPTION = "CUBIC_CONVOLUTION"  
MAP_PROJECTION_LORA = "NA"  
END_GROUP = PROJECTION_PARAMETERS  
END_GROUP = L1_METADATA_FILE  
END
```

### 9.3 Metadata imagen año 2015

```
GROUP = L1_METADATA_FILE
  GROUP = METADATA_FILE_INFO
    ORIGIN = "Image courtesy of the U.S. Geological Survey"
    REQUEST_ID = "0501703305692_00007"
    LANDSAT_SCENE_ID = "LC80090582015363LGN01"
    LANDSAT_PRODUCT_ID =
"LC08_L1TP_009058_20151229_20170331_01_T1"
    COLLECTION_NUMBER = 01
    FILE_DATE = 2017-03-31T12:12:19Z
    STATION_ID = "LGN"
    PROCESSING_SOFTWARE_VERSION = "LPGS_2.7.0"
  END_GROUP = METADATA_FILE_INFO
  GROUP = PRODUCT_METADATA
    DATA_TYPE = "L1TP"
    COLLECTION_CATEGORY = "T1"
    ELEVATION_SOURCE = "GLS2000"
    OUTPUT_FORMAT = "GEOTIFF"
    SPACECRAFT_ID = "LANDSAT_8"
    SENSOR_ID = "OLI_TIRS"
    WRS_PATH = 9
    WRS_ROW = 58
    NADIR_OFFNADIR = "NADIR"
    TARGET_WRS_PATH = 9
    TARGET_WRS_ROW = 58
    DATE_ACQUIRED = 2015-12-29
    SCENE_CENTER_TIME = "15:19:26.7781660Z"
    CORNER_UL_LAT_PRODUCT = 3.93763
    CORNER_UL_LON_PRODUCT = -77.34680
    CORNER_UR_LAT_PRODUCT = 3.94089
    CORNER_UR_LON_PRODUCT = -75.29636
    CORNER_LL_LAT_PRODUCT = 1.83596
    CORNER_LL_LON_PRODUCT = -77.34249
    CORNER_LR_LAT_PRODUCT = 1.83748
    CORNER_LR_LON_PRODUCT = -75.29581
    CORNER_UL_PROJECTION_X_PRODUCT = 239400.000
    CORNER_UL_PROJECTION_Y_PRODUCT = 435600.000
    CORNER_UR_PROJECTION_X_PRODUCT = 467100.000
    CORNER_UR_PROJECTION_Y_PRODUCT = 435600.000
    CORNER_LL_PROJECTION_X_PRODUCT = 239400.000
    CORNER_LL_PROJECTION_Y_PRODUCT = 203100.000
    CORNER_LR_PROJECTION_X_PRODUCT = 467100.000
    CORNER_LR_PROJECTION_Y_PRODUCT = 203100.000
    PANCHROMATIC_LINES = 15501
    PANCHROMATIC_SAMPLES = 15181
    REFLECTIVE_LINES = 7751
    REFLECTIVE_SAMPLES = 7591
    THERMAL_LINES = 7751
    THERMAL_SAMPLES = 7591
    FILE_NAME_BAND_1 =
"LC08_L1TP_009058_20151229_20170331_01_T1_B1.TIF"
    FILE_NAME_BAND_2 =
"LC08_L1TP_009058_20151229_20170331_01_T1_B2.TIF"
```

```
FILE_NAME_BAND_3 =  
"LC08_L1TP_009058_20151229_20170331_01_T1_B3.TIF"  
FILE_NAME_BAND_4 =  
"LC08_L1TP_009058_20151229_20170331_01_T1_B4.TIF"  
FILE_NAME_BAND_5 =  
"LC08_L1TP_009058_20151229_20170331_01_T1_B5.TIF"  
FILE_NAME_BAND_6 =  
"LC08_L1TP_009058_20151229_20170331_01_T1_B6.TIF"  
FILE_NAME_BAND_7 =  
"LC08_L1TP_009058_20151229_20170331_01_T1_B7.TIF"  
FILE_NAME_BAND_8 =  
"LC08_L1TP_009058_20151229_20170331_01_T1_B8.TIF"  
FILE_NAME_BAND_9 =  
"LC08_L1TP_009058_20151229_20170331_01_T1_B9.TIF"  
FILE_NAME_BAND_10 =  
"LC08_L1TP_009058_20151229_20170331_01_T1_B10.TIF"  
FILE_NAME_BAND_11 =  
"LC08_L1TP_009058_20151229_20170331_01_T1_B11.TIF"  
FILE_NAME_BAND_QUALITY =  
"LC08_L1TP_009058_20151229_20170331_01_T1_BQA.TIF"  
ANGLE_COEFFICIENT_FILE_NAME =  
"LC08_L1TP_009058_20151229_20170331_01_T1_ANG.txt"  
METADATA_FILE_NAME =  
"LC08_L1TP_009058_20151229_20170331_01_T1_MTL.txt"  
CPF_NAME = "LC08CPF_20151001_20151231_01.01"  
BPF_NAME_OLI = "LO8BPF20151229150316_20151229154556.02"  
BPF_NAME_TIRS = "LT8BPF20151225202015_20160110080819.04"  
RLUT_FILE_NAME = "LC08RLUT_20150303_20431231_01_12.h5"  
END_GROUP = PRODUCT METADATA  
GROUP = IMAGE_ATTRIBUTES  
CLOUD_COVER = 41.31  
CLOUD_COVER_LAND = 41.31  
IMAGE_QUALITY_OLI = 9  
IMAGE_QUALITY_TIRS = 9  
TIRS_SSM_MODEL = "FINAL"  
TIRS_SSM_POSITION_STATUS = "ESTIMATED"  
TIRS_STRAY_LIGHT_CORRECTION_SOURCE = "TIRS"  
ROLL_ANGLE = -0.001  
SUN_AZIMUTH = 136.25656982  
SUN_ELEVATION = 52.96916817  
EARTH_SUN_DISTANCE = 0.9833529  
SATURATION_BAND_1 = "N"  
SATURATION_BAND_2 = "Y"  
SATURATION_BAND_3 = "Y"  
SATURATION_BAND_4 = "Y"  
SATURATION_BAND_5 = "Y"  
SATURATION_BAND_6 = "Y"  
SATURATION_BAND_7 = "Y"  
SATURATION_BAND_8 = "N"  
SATURATION_BAND_9 = "N"  
GROUND_CONTROL_POINTS_VERSION = 4  
GROUND_CONTROL_POINTS_MODEL = 128  
GEOMETRIC_RMSE_MODEL = 9.532  
GEOMETRIC_RMSE_MODEL_Y = 7.660
```

```
GEOMETRIC_RMSE_MODEL_X = 5.673
GROUND_CONTROL_POINTS_VERIFY = 72
GEOMETRIC_RMSE_VERIFY = 8.532
TRUNCATION_OLI = "UPPER"
END_GROUP = IMAGE_ATTRIBUTES
GROUP = MIN_MAX_RADIANCE
  RADIANCE_MAXIMUM_BAND_1 = 786.01447
  RADIANCE_MINIMUM_BAND_1 = -64.90933
  RADIANCE_MAXIMUM_BAND_2 = 804.88843
  RADIANCE_MINIMUM_BAND_2 = -66.46795
  RADIANCE_MAXIMUM_BAND_3 = 741.69781
  RADIANCE_MINIMUM_BAND_3 = -61.24965
  RADIANCE_MAXIMUM_BAND_4 = 625.44135
  RADIANCE_MINIMUM_BAND_4 = -51.64915
  RADIANCE_MAXIMUM_BAND_5 = 382.73892
  RADIANCE_MINIMUM_BAND_5 = -31.60670
  RADIANCE_MAXIMUM_BAND_6 = 95.18369
  RADIANCE_MINIMUM_BAND_6 = -7.86030
  RADIANCE_MAXIMUM_BAND_7 = 32.08200
  RADIANCE_MINIMUM_BAND_7 = -2.64934
  RADIANCE_MAXIMUM_BAND_8 = 707.82751
  RADIANCE_MINIMUM_BAND_8 = -58.45263
  RADIANCE_MAXIMUM_BAND_9 = 149.58305
  RADIANCE_MINIMUM_BAND_9 = -12.35262
  RADIANCE_MAXIMUM_BAND_10 = 22.00180
  RADIANCE_MINIMUM_BAND_10 = 0.10033
  RADIANCE_MAXIMUM_BAND_11 = 22.00180
  RADIANCE_MINIMUM_BAND_11 = 0.10033
END_GROUP = MIN_MAX_RADIANCE
GROUP = MIN_MAX_REFLECTANCE
  REFLECTANCE_MAXIMUM_BAND_1 = 1.210700
  REFLECTANCE_MINIMUM_BAND_1 = -0.099980
  REFLECTANCE_MAXIMUM_BAND_2 = 1.210700
  REFLECTANCE_MINIMUM_BAND_2 = -0.099980
  REFLECTANCE_MAXIMUM_BAND_3 = 1.210700
  REFLECTANCE_MINIMUM_BAND_3 = -0.099980
  REFLECTANCE_MAXIMUM_BAND_4 = 1.210700
  REFLECTANCE_MINIMUM_BAND_4 = -0.099980
  REFLECTANCE_MAXIMUM_BAND_5 = 1.210700
  REFLECTANCE_MINIMUM_BAND_5 = -0.099980
  REFLECTANCE_MAXIMUM_BAND_6 = 1.210700
  REFLECTANCE_MINIMUM_BAND_6 = -0.099980
  REFLECTANCE_MAXIMUM_BAND_7 = 1.210700
  REFLECTANCE_MINIMUM_BAND_7 = -0.099980
  REFLECTANCE_MAXIMUM_BAND_8 = 1.210700
  REFLECTANCE_MINIMUM_BAND_8 = -0.099980
  REFLECTANCE_MAXIMUM_BAND_9 = 1.210700
  REFLECTANCE_MINIMUM_BAND_9 = -0.099980
END_GROUP = MIN_MAX_REFLECTANCE
GROUP = MIN_MAX_PIXEL_VALUE
  QUANTIZE_CAL_MAX_BAND_1 = 65535
  QUANTIZE_CAL_MIN_BAND_1 = 1
  QUANTIZE_CAL_MAX_BAND_2 = 65535
  QUANTIZE_CAL_MIN_BAND_2 = 1
```

```
QUANTIZE_CAL_MAX_BAND_3 = 65535
QUANTIZE_CAL_MIN_BAND_3 = 1
QUANTIZE_CAL_MAX_BAND_4 = 65535
QUANTIZE_CAL_MIN_BAND_4 = 1
QUANTIZE_CAL_MAX_BAND_5 = 65535
QUANTIZE_CAL_MIN_BAND_5 = 1
QUANTIZE_CAL_MAX_BAND_6 = 65535
QUANTIZE_CAL_MIN_BAND_6 = 1
QUANTIZE_CAL_MAX_BAND_7 = 65535
QUANTIZE_CAL_MIN_BAND_7 = 1
QUANTIZE_CAL_MAX_BAND_8 = 65535
QUANTIZE_CAL_MIN_BAND_8 = 1
QUANTIZE_CAL_MAX_BAND_9 = 65535
QUANTIZE_CAL_MIN_BAND_9 = 1
QUANTIZE_CAL_MAX_BAND_10 = 65535
QUANTIZE_CAL_MIN_BAND_10 = 1
QUANTIZE_CAL_MAX_BAND_11 = 65535
QUANTIZE_CAL_MIN_BAND_11 = 1
END_GROUP = MIN_MAX_PIXEL_VALUE
GROUP = RADIOMETRIC_RESCALING
RADIANCE_MULT_BAND_1 = 1.2984E-02
RADIANCE_MULT_BAND_2 = 1.3296E-02
RADIANCE_MULT_BAND_3 = 1.2252E-02
RADIANCE_MULT_BAND_4 = 1.0332E-02
RADIANCE_MULT_BAND_5 = 6.3226E-03
RADIANCE_MULT_BAND_6 = 1.5724E-03
RADIANCE_MULT_BAND_7 = 5.2997E-04
RADIANCE_MULT_BAND_8 = 1.1693E-02
RADIANCE_MULT_BAND_9 = 2.4710E-03
RADIANCE_MULT_BAND_10 = 3.3420E-04
RADIANCE_MULT_BAND_11 = 3.3420E-04
RADIANCE_ADD_BAND_1 = -64.92232
RADIANCE_ADD_BAND_2 = -66.48124
RADIANCE_ADD_BAND_3 = -61.26190
RADIANCE_ADD_BAND_4 = -51.65948
RADIANCE_ADD_BAND_5 = -31.61303
RADIANCE_ADD_BAND_6 = -7.86187
RADIANCE_ADD_BAND_7 = -2.64987
RADIANCE_ADD_BAND_8 = -58.46432
RADIANCE_ADD_BAND_9 = -12.35509
RADIANCE_ADD_BAND_10 = 0.10000
RADIANCE_ADD_BAND_11 = 0.10000
REFLECTANCE_MULT_BAND_1 = 2.0000E-05
REFLECTANCE_MULT_BAND_2 = 2.0000E-05
REFLECTANCE_MULT_BAND_3 = 2.0000E-05
REFLECTANCE_MULT_BAND_4 = 2.0000E-05
REFLECTANCE_MULT_BAND_5 = 2.0000E-05
REFLECTANCE_MULT_BAND_6 = 2.0000E-05
REFLECTANCE_MULT_BAND_7 = 2.0000E-05
REFLECTANCE_MULT_BAND_8 = 2.0000E-05
REFLECTANCE_MULT_BAND_9 = 2.0000E-05
REFLECTANCE_ADD_BAND_1 = -0.10000
REFLECTANCE_ADD_BAND_2 = -0.10000
REFLECTANCE_ADD_BAND_3 = -0.10000
```

```
REFLECTANCE_ADD_BAND_4 = -0.100000
REFLECTANCE_ADD_BAND_5 = -0.100000
REFLECTANCE_ADD_BAND_6 = -0.100000
REFLECTANCE_ADD_BAND_7 = -0.100000
REFLECTANCE_ADD_BAND_8 = -0.100000
REFLECTANCE_ADD_BAND_9 = -0.100000
END_GROUP = RADIOMETRIC_RESCALING
GROUP = TIRS_THERMAL_CONSTANTS
  K1_CONSTANT_BAND_10 = 774.8853
  K2_CONSTANT_BAND_10 = 1321.0789
  K1_CONSTANT_BAND_11 = 480.8883
  K2_CONSTANT_BAND_11 = 1201.1442
END_GROUP = TIRS_THERMAL_CONSTANTS
GROUP = PROJECTION_PARAMETERS
  MAP_PROJECTION = "UTM"
  DATUM = "WGS84"
  ELLIPSOID = "WGS84"
  UTM_ZONE = 18
  GRID_CELL_SIZE_PANCHROMATIC = 15.00
  GRID_CELL_SIZE_REFLECTIVE = 30.00
  GRID_CELL_SIZE_THERMAL = 30.00
  ORIENTATION = "NORTH_UP"
  RESAMPLING_OPTION = "CUBIC_CONVOLUTION"
END_GROUP = PROJECTION_PARAMETERS
END_GROUP = L1_METADATA_FILE
END
```

## 9.4 Índice de separabilidad 1984

Input File: Reflectancia\_1984

Agua:

```
Cultivos: (1.99999999 2.00000000)
Pastos: (1.99999996 2.00000000)
Suelo Desnudo: (1.99999752 2.00000000)
Area Urbana: (2.00000000 2.00000000)
Nubes: (2.00000000 2.00000000)
Sombras: (1.99139576 1.99999979)
```

Cultivos:

```
Agua: (1.99999999 2.00000000)
Pastos: (1.97232937 1.99896905)
Suelo Desnudo: (1.99999972 2.00000000)
Area Urbana: (2.00000000 2.00000000)
Nubes: (2.00000000 2.00000000)
Sombras: (1.99999982 2.00000000)
```

Pastos:

```
Agua: (1.99999996 2.00000000)
Cultivos: (1.97232937 1.99896905)
Suelo Desnudo: (1.99935176 2.00000000)
Area Urbana: (1.99999986 2.00000000)
```



Nubes: (2.00000000 2.00000000)  
Sombras: (1.99999983 2.00000000)

Suelo Desnudo:

Agua: (1.99999752 2.00000000)  
Cultivos: (1.99999972 2.00000000)  
Pastos: (1.99935176 2.00000000)  
Area Urbana: (1.88367895 1.99545098)  
Nubes: (2.00000000 2.00000000)  
Sombras: (1.99992363 2.00000000)

Area Urbana:

Agua: (2.00000000 2.00000000)  
Cultivos: (2.00000000 2.00000000)  
Pastos: (1.99999986 2.00000000)  
Suelo Desnudo: (1.88367895 1.99545098)  
Nubes: (2.00000000 2.00000000)  
Sombras: (2.00000000 2.00000000)

Nubes:

Agua: (2.00000000 2.00000000)  
Cultivos: (2.00000000 2.00000000)  
Pastos: (2.00000000 2.00000000)  
Suelo Desnudo: (2.00000000 2.00000000)  
Area Urbana: (2.00000000 2.00000000)  
Sombras: (2.00000000 2.00000000)

Sombras:

Agua: (1.99139576 1.99999979)  
Cultivos: (1.99999982 2.00000000)  
Pastos: (1.99999983 2.00000000)  
Suelo Desnudo: (1.99992363 2.00000000)  
Area Urbana: (2.00000000 2.00000000)  
Nubes: (2.00000000 2.00000000)

Pair Separation (least to most);

Suelo Desnudo and Area Urbana - 1.88367895  
Cultivos and Pastos - 1.97232937  
Agua and Sombras - 1.99139576  
Pastos and Suelo Desnudo - 1.99935176  
Suelo Desnudo and Sombras - 1.99992363  
Agua and Suelos Desnudo - 1.99999752  
Cultivos and Suelo Desnudo - 1.99999972  
Cultivos and Sombras - 1.99999982  
Pastos and Sombras - 1.99999983  
Pastos and Area Urbana - 1.99999986  
Agua and Pastos - 1.99999996  
Agua and Cultivos - 1.99999999  
Agua and Area Urbana - 2.00000000  
Area Urbana and Sombras - 2.00000000  
Cultivos and Area Urbana - 2.00000000  
Suelo Desnudo and Nubes - 2.00000000  
Area Urbana and Nubes - 2.00000000

Cultivos and Nubes - 2.00000000  
Nubes and Sombras - 2.00000000  
Pastos and Nubes - 2.00000000  
Agua and Nubes - 2.00000000

## 9.5 Índice de separabilidad 2000

Input File: Reflectancia\_2000

Nubes2000:

Area\_Urbana2000: (2.00000000 2.00000000)  
Pastos2000: (2.00000000 2.00000000)  
Suelo\_desnudo2000: (2.00000000 2.00000000)  
Cultivos2000: (2.00000000 2.00000000)  
Agua2000: (2.00000000 2.00000000)  
Sombras2000: (2.00000000 2.00000000)

Area\_Urbana2000:

Nubes2000: (2.00000000 2.00000000)  
Pastos2000: (2.00000000 2.00000000)  
Suelo\_desnudo2000: (1.96671372 1.99862007)  
Cultivos2000: (2.00000000 2.00000000)  
Agua2000: (1.99999999 2.00000000)  
Sombras2000: (2.00000000 2.00000000)

Pastos2000:

Nubes2000: (2.00000000 2.00000000)  
Area\_Urbana2000: (2.00000000 2.00000000)  
Suelo\_desnudo2000: (1.99929127 2.00000000)  
Cultivos2000: (1.91269602 1.99859090)  
Agua2000: (1.99999994 2.00000000)  
Sombras2000: (2.00000000 2.00000000)

Suelo\_desnudo2000:

Nubes2000: (2.00000000 2.00000000)  
Area\_Urbana2000: (1.96671372 1.99862007)  
Pastos2000: (1.99929127 2.00000000)  
Cultivos2000: (1.99999996 2.00000000)  
Agua2000: (2.00000000 2.00000000)  
Sombras2000: (2.00000000 2.00000000)

Cultivos2000:

Nubes2000: (2.00000000 2.00000000)  
Area\_Urbana2000: (2.00000000 2.00000000)  
Pastos2000: (1.91269602 1.99859090)  
Suelo\_desnudo2000: (1.99999996 2.00000000)  
Agua2000: (1.99999989 2.00000000)  
Sombras2000: (2.00000000 2.00000000)

Agua2000:

Nubes2000: (2.00000000 2.00000000)  
Area\_Urbana2000: (1.99999999 2.00000000)

Pastos2000: (1.99999994 2.00000000)  
Suelo\_desnudo2000: (2.00000000 2.00000000)  
Cultivos2000: (1.99999989 2.00000000)  
Sombras2000: (1.99997762 2.00000000)

Sombras2000:

Nubes2000: (2.00000000 2.00000000)  
Area\_Urbana2000: (2.00000000 2.00000000)  
Pastos2000: (2.00000000 2.00000000)  
Suelo\_desnudo2000: (2.00000000 2.00000000)  
Cultivos2000: (2.00000000 2.00000000)  
Agua2000: (1.99997762 2.00000000)

Pair Separation (least to most);

Pastos2000 and Cultivos2000 - 1.91269602  
Area\_Urbana2000 and Suelo\_desnudo2000 - 1.96671372  
Pastos2000 and Suelo\_desnudo2000 - 1.99929127  
Agua2000 and Sombras2000 - 1.99997762  
Cultivos2000 and Agua2000 - 1.99999989  
Pastos2000 and Agua2000 - 1.99999994  
Suelo\_desnudo2000 and Cultivos2000 - 1.99999996  
Area\_Urbana2000 and Agua2000 - 1.99999999  
Area\_Urbana2000 and Pastos2000 - 2.00000000  
Suelo\_desnudo2000 and Agua2000 - 2.00000000  
Suelo\_desnudo2000 and Sombras2000 - 2.00000000  
Area\_Urbana2000 and Sombras2000 - 2.00000000  
Pastos2000 and Sombras2000 - 2.00000000  
Area\_Urbana2000 and Cultivos2000 - 2.00000000  
Cultivos2000 and Sombras2000 - 2.00000000  
Nubes2000 and Cultivos2000 - 2.00000000  
Nubes2000 and Pastos2000 - 2.00000000  
Nubes2000 and Suelo\_desnudo2000 - 2.00000000  
Nubes2000 and Area\_Urbana2000 - 2.00000000  
Nubes2000 and Sombras2000 - 2.00000000  
Nubes2000 and Agua2000 - 2.00000000

## 9.6 Indice de separabilidad 2015

Input File: Reflectancia\_2015

Agua:

Suelo\_desnudo: (2.00000000 2.00000000)  
Area\_Urbana: (1.99999905 2.00000000)  
Nubes: (2.00000000 2.00000000)  
Pastos: (1.99999995 2.00000000)  
Cultivos: (1.99999886 2.00000000)  
Sombras: (1.99842765 2.00000000)

Suelo\_desnudo:

Agua: (2.00000000 2.00000000)  
Area\_Urbana: (1.99413203 1.99999999)

Nubes: (1.99999998 2.00000000)  
Pastos: (1.99857103 1.99999986)  
Cultivos: (1.99999919 2.00000000)  
Sombras: (2.00000000 2.00000000)

Area\_Urbana:

Agua: (1.99999905 2.00000000)  
Suelo\_desnudo: (1.99413203 1.99999999)  
Nubes: (1.99999999 2.00000000)  
Pastos: (1.99999999 2.00000000)  
Cultivos: (2.00000000 2.00000000)  
Sombras: (1.99999977 2.00000000)

Nubes:

Agua: (2.00000000 2.00000000)  
Suelo\_desnudo: (1.99999998 2.00000000)  
Area\_Urbana: (1.99999999 2.00000000)  
Pastos: (2.00000000 2.00000000)  
Cultivos: (2.00000000 2.00000000)  
Sombras: (2.00000000 2.00000000)

Pastos:

Agua: (1.99999995 2.00000000)  
Suelo\_desnudo: (1.99857103 1.99999986)  
Area\_Urbana: (1.99999999 2.00000000)  
Nubes: (2.00000000 2.00000000)  
Cultivos: (1.99863050 1.99999736)  
Sombras: (2.00000000 2.00000000)

Cultivos:

Agua: (1.99999886 2.00000000)  
Suelo\_desnudo: (1.99999919 2.00000000)  
Area\_Urbana: (2.00000000 2.00000000)  
Nubes: (2.00000000 2.00000000)  
Pastos: (1.99863050 1.99999736)  
Sombras: (2.00000000 2.00000000)

Sombras:

Agua: (1.99842765 2.00000000)  
Suelo\_desnudo: (2.00000000 2.00000000)  
Area\_Urbana: (1.99999977 2.00000000)  
Nubes: (2.00000000 2.00000000)  
Pastos: (2.00000000 2.00000000)  
Cultivos: (2.00000000 2.00000000)

Pair Separation (least to most);

Suelo\_desnudo and Area\_Urbana - 1.99413203  
Agua and Sombras - 1.99842765  
Suelo\_desnudo and Pastos - 1.99857103  
Pastos and Cultivos - 1.99863050  
Agua and Cultivos - 1.99999886  
Agua and Area\_Urbana - 1.99999905  
Suelo\_desnudo and Cultivos - 1.99999919

Area\_Urbana and Sombras - 1.99999977  
Agua and Pastos - 1.99999995  
Suelo\_desnudo and Nubes - 1.99999998  
Area\_Urbana and Pastos - 1.99999999  
Area\_Urbana and Nubes - 1.99999999  
Agua and Suelo\_desnudo - 2.00000000  
Nubes and Pastos - 2.00000000  
Area\_Urbana and Cultivos - 2.00000000  
Pastos and Sombras - 2.00000000  
Nubes and Cultivos - 2.00000000  
Agua and Nubes - 2.00000000  
Nubes and Sombras - 2.00000000  
Suelo\_desnudo and Sombras - 2.00000000  
Cultivos and Sombras - 2.00000000

## BIBLIOGRAFÍA

- Aguilar, H., Mora, R., & Vargas, C. (2014). Metodología para la corrección atmosférica de imágenes Aster, Rapideye, Spot 2 y Landsat 8 con el módulo FLAASH del software ENVI. 5-11.
- Yébenes Gómez, Á., & Giner Sotos, Á. (s.f.). *Clasificación Digital de Imágenes por Satélite*. Obtenido de Mural, Universidad de Valencia: <http://mural.uv.es/gislo/telemedida.pdf>
- Administración de Parques Nacionales. (2005). *Protocolo para el procesamiento de imágenes satelitales Landsat para aplicaciones de la Administración de Parques Nacionales*. Buenos Aires, Argentina.
- Alarcón Barrera, D. A. (2015). *La conurbación como escenario de ordenamiento en la región metropolitana de Santiago de Cali*. Obtenido de <http://bdigital.unal.edu.co/>: <http://bdigital.unal.edu.co/53046/1/duverandresalarconbarrera.2015.pdf>
- Almeida, Duriavich, Napolitano, & Feoli. (2009). Aplicación de técnicas SIG, Sensoramiento Remoto y Análisis Multicriterio para la Detección de Impactos Antropogénicos en la Cobertura de Suelos y su Proyección para el 2010. Caso de estudio: Estuario de Santos (Brasil). *Revista Tecnológica ESPOL*, 7. Recuperado el 11 de 01 de 2018
- Arango Gutiérrez, M., Branch Bedoya, J., & Botero Fernández, V. (2005). Clasificación no supervisada de coberturas vegetales sobre imágenes digitales de sensores remotos: "Landsat – Remotos: "Landsat – ETM+. *Revista Facultad Nacional de Agronomía*, 58, 26.
- Bosque Sendra, J. (2001). PLANIFICACIÓN Y GESTIÓN DEL TERRITORIO. De los SIG a los Sistemas de ayuda a la decisión espacial (SADE). *El Campo de las Ciencias y las Artes*, 30. Recuperado el 10 de 01 de 2018
- Chuvieco Salinero, E. (05 de 2002). *Teledetección Ambiental*. Ariel.
- Chuvieco, E. (1990). *Fundamentos de Teledetección Espacial*. Madrid: Rialp, S.A.
- DAPM. (2000). *POT Documento técnico de Soporte*. Cali.
- Di Gregorio, A., & Jansen, L. (2000). *Land cover classification system*. Obtenido de Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación - FAO: <http://www.fao.org/docrep/003/x0596e/x0596e00.htm>
- EOT Boavita, Boyaca. (2010). <http://cdim.esap.edu.co/BancoConocimiento>. Recuperado el 10 de 01 de 2018, de [http://cdim.esap.edu.co/BancoConocimiento/B/boavita\\_-\\_boyaca\\_-\\_eot\\_-\\_2002\\_-\\_2010/boavita\\_-\\_boyaca\\_-\\_eot\\_-\\_2002\\_-\\_2010.asp](http://cdim.esap.edu.co/BancoConocimiento/B/boavita_-_boyaca_-_eot_-_2002_-_2010/boavita_-_boyaca_-_eot_-_2002_-_2010.asp)
- FAO. (1996). *Forest Resource Assessment Programme 1990, Survey of Tropical Forest Cover and Study of Change Processes*.
- Hantson, S. (2011). *Asociación española de teledetección*. Obtenido de <http://www.aet.org.es/?q=revista36-7>

- Martínez Toro, P. M., & Buitrago, O. (12 de 2011). *Biblioteca Digital Univalle*. Obtenido de <http://bibliotecadigital.univalle.edu.co/xmlui/handle/10893/10304>
- Martínez, P. M. (Marzo de 2005). *La integración subregional y la caracterización funcional, morfológica del fenómeno de metropolización en el área de influencia metropolitana de Cali*. Obtenido de researchgate.net: <https://www.researchgate.net/publication/316842205>
- Palacios Bermúdez, E. (2015). *Análisis multitemporal en la cobertura boscosa de la zona norte del departamento del Chocó, 1990 – 2014*.
- Posada , E. (2012). Manuel de prácticas de Percepción Remota. Recuperado el 10 de 01 de 2018
- Posada, E. (2008). Introducción al Procesamiento Digital. Bogota: Instituto Geográfico Agustín Codazzi.
- Ramírez Zapata, A. (2015). *Análisis multitemporal mediante sensores remotos de cobertura de la tierra para el periodo de tiempo 1999 - 2011 en el municipio de San Jacinto Bolívar*. Recuperado el 01 de 2018, de Repositorio Institucional UMNG: <https://repository.unimilitar.edu.co/>
- Riño Melo, O. (2002). *Consideraciones y métodos para la detección de cambios empleando imágenes de satélite en el municipio de Paipa*. Colombia Forestal. Obtenido de <https://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/colfor/article/view/3306/4808>
- Rodríguez, W. (2012). *Análisis Espacial y Multitemporal de la Cobertura y Uso del Suelo con Base en Imágenes de Satélites en la Subcuenca Río Dipilto, Nueva Segovia, Nicaragua (1993-2000-2011)*. Obtenido de <http://repositorio.una.edu.ni>
- Rojas Ortiz, A., & Viveros Soto, V. (2016). *Análisis multitemporal del crecimiento urbano de Pasto entre 1989 y 2014 usando SIG*. Tesis de grado, Pasto. Recuperado el 09 de 2018, de <http://ridum.umanizales.edu.co:8080/xmlui/handle/6789/3039>
- Romero, F. S. (2006). La Teledetección satelital y los sistemas de protección ambiental. *AquaTic*, 29. Recuperado el 11 de 01 de 2018, de [http://www.revistaaquatic.com/aquatic/pdf/24\\_02.pdf](http://www.revistaaquatic.com/aquatic/pdf/24_02.pdf)
- Sánchez Steiner, L. (20 de 09 de 2008). *Dialnet*. Recuperado el 05 de 01 de 2018, de <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/3408685.pdf>
- Tibaquira Castro, H. (2016). *Análisis multitemporal del crecimiento urbano de la zona de expansión para el periodo de 1987 – 2015 en el municipio de Ibagué, Tolima*. Obtenido de <https://repository.unimilitar.edu.co/>
- Universiad Externado. (08 de 2007). <https://www.uexternado.edu.co>. Recuperado el 05 de 01 de 2018, de [https://www.uexternado.edu.co/wp-content/uploads/2017/04/Ciudad\\_espacio\\_y\\_poblacion.\\_El\\_proceso\\_de-Urbanizacion.pdf](https://www.uexternado.edu.co/wp-content/uploads/2017/04/Ciudad_espacio_y_poblacion._El_proceso_de-Urbanizacion.pdf)