

**Análisis multitemporal por teledetección del cambio de coberturas en las veredas  
Pantanillo y Las Palmas del municipio de Envigado en el periodo comprendido entre los  
años 1997 y 2016**

Gustavo Adolfo Alzate Giraldo  
Diana Patricia Sánchez Gómez

Trabajo de grado presentado como requisito parcial  
para optar al título de Magister en Teledetección

Tutora: Dra. Carolina Suárez Valencia



Universidad Católica de Manizales  
Facultad de Ingeniería y Arquitectura  
Maestría en Teledetección  
Manizales  
2018

## Dedicatoria

*Agradezco a la vida por darme la oportunidad de contar con una familia unida sobre la cual puedo cimentar mis logros y alegrías, mis padres cuyo ejemplo y tesón me enseñaron a perseverar y alcanzar mis metas, a mi esposa por estar al lado mío y ser parte de las bases de mi vida y a mi hijo David cuya alegría y amor me iluminan y alimentan en el camino de la vida, al cual espero ser ejemplo digno y de orgullo.*

Gustavo

*A Jacobo, Emma y Emiliano  
Goticas de amor  
Diana*

## **Agradecimientos**

Agradecemos a la ingeniera forestal Ingrid Natalia Mazo, compañera de estudio, por sus aportes en la corrección del documento y en las sesiones de clase, a Jimmy Calvache por su oportuna colaboración técnica y conceptual, a la economista María Camila Alzate por su valiosa y desinteresada ayuda en la edición del texto, a los ingenieros Olga Inés Restrepo y Carlos Alberto Alzate por su diligencia y ayuda con la información base para el estudio, al profesor Humberto Caballero por su visión y contribuciones en la concepción del tema desarrollado, a la doctora Carolina Suarez, directora de la tesis, por su acompañamiento y al ingeniero Oscar Cardona, director de la maestría, por su gentileza y apoyo.

## Tabla de contenido

1	Introducción.....	13
2	Objetivos.....	20
2.1	Objetivo general .....	20
2.2	Objetivos específicos.....	20
3	Marco teórico.....	21
3.1	Principios y fundamentos de la teledetección .....	21
3.1.1	Correcciones de la imagen.....	25
3.1.2	Clasificación de imágenes.....	26
3.1.3	Índices.....	29
3.1.4	Validación de la clasificación de imágenes .....	30
3.2	Plan de Ordenamiento Territorial (POT) de Envigado .....	32
3.3	Cobertura y uso del suelo .....	33
3.4	El concepto de borde .....	36
4	Descripción del área de estudio.....	37
4.1	Localización geográfica .....	37
4.2	Delimitación zonal .....	38
4.3	Fisiografía.....	39
4.4	Antecedentes históricos del municipio.....	40
5	Metodología.....	42
5.1	Escala de trabajo.....	43
5.2	Procesamiento de imágenes satelitales.....	45
5.2.1	Método de almacenamiento.....	46
5.2.2	Calibración radiométrica (conversión de niveles digitales a radiancia).....	46
5.2.3	Corrección atmosférica.....	47
5.2.4	Re escalado de valores de radiancia (valores entre 0 y 1).....	48
5.2.5	Restauración de sectores perdidos .....	48
5.2.6	Clasificación supervisada.....	48
5.2.7	Análisis dinámico de coberturas.....	51
5.3	Procesamiento de ortofotografías.....	51
5.4	Índices NDVI y BU.....	52
6	Resultados.....	54

6.1	Validación de la clasificación supervisada.....	54
6.2	Mapas de coberturas según análisis de imágenes satelitales.....	58
6.2.1	Mapa de cobertura año 1997.....	58
6.2.2	Mapa de cobertura año 2000.....	60
6.2.3	Mapa de cobertura año 2004.....	62
6.2.4	Mapa de cobertura año 2005.....	63
6.2.5	Mapa de cobertura año 2009.....	65
6.2.6	Mapa de cobertura año 2013.....	66
6.2.7	Mapa de cobertura año 2014.....	68
6.2.8	Mapa de cobertura año 2016.....	69
6.3	Cambio de coberturas según análisis de imágenes satelitales.....	73
6.4	Mapas de coberturas según análisis de ortofotografías.....	82
6.4.1	Mapa de cobertura año 2004.....	82
6.4.2	Mapa de cobertura año 2007.....	84
6.4.3	Mapa de cobertura año 2015.....	85
6.5	Cambio de coberturas según análisis de ortofotografías.....	87
6.5.1	Mapa de cambio de cobertura años 2004-2007.....	87
6.5.2	Mapa de cambio de cobertura años 2007-2015.....	88
6.5.3	Mapa de cambio de cobertura años 2004-2015.....	89
6.6	Índices NDVI y BU.....	94
6.7	Estructura predial.....	97
6.8	Validación de resultados.....	102
7	Discusión.....	111
8	Conclusiones.....	121
9	Recomendaciones.....	125
10	Referencias.....	126

## Lista de figuras

<i>Figura 1.</i> Espectro electromagnético. Fuente: Chuvieco (1995).....	22
<i>Figura 2.</i> Sistema de teledetección. Fuente: Adaptación propia a partir de Chuvieco (1995)....	23
<i>Figura 3.</i> Distorsiones de la misión satelital en los ejes X, Y Z. Fuente: Elaboración propia. ....	25
<i>Figura 4.</i> Leyenda de Coberturas de tierra para Colombia. Fuente: Ministerio de Ambiente (2010).....	35
<i>Figura 5.</i> Ubicación del municipio de Envigado. Fuente: Elaboración propia .....	37
<i>Figura 6.</i> Metodología general. Fuente: Elaboración propia.....	42
<i>Figura 7.</i> Metodología del tratamiento de imágenes satelitales. Fuente: Elaboración propia.....	50
<i>Figura 8.</i> Mapa de coberturas año 1997. Fuente: Elaboración propia.....	59
<i>Figura 9.</i> Mapa de coberturas año 2000. Fuente: Elaboración propia.....	61
<i>Figura 10.</i> Mapa de coberturas año 2004. Fuente: Elaboración propia.....	63
<i>Figura 11.</i> Mapa de coberturas año 2005. Fuente: Elaboración propia.....	64
<i>Figura 12.</i> Mapa de coberturas año 2009. Fuente: Elaboración propia.....	66
<i>Figura 13.</i> Mapa de coberturas año 2013. Fuente: Elaboración propia.....	67
<i>Figura 14.</i> Mapa de coberturas año 2014. Fuente: Elaboración propia.....	69
<i>Figura 15.</i> Mapa de coberturas año 2015. Fuente: Elaboración propia.....	70
<i>Figura 16.</i> Variación del área total de las coberturas analizadas con imágenes Landsat. Fuente: Elaboración propia .....	72
<i>Figura 17.</i> Cambio de coberturas en vereda Las Palmas. Fuente: Elaboración propia .....	75
<i>Figura 18.</i> Cambio de coberturas en vereda Pantanillo. Fuente: Elaboración propia .....	77
<i>Figura 19.</i> Cambio de coberturas en área de estudio. Fuente: Elaboración propia .....	79
<i>Figura 20.</i> Variación de la cobertura Bosque. Fuente: Elaboración propia .....	80
<i>Figura 21.</i> Variación de la cobertura Pasto. Fuente: Elaboración propia.....	81
<i>Figura 22.</i> Variación de la cobertura Suelo desnudo. Fuente: Elaboración propia.....	81
<i>Figura 23.</i> Variación de la cobertura antrópico. Fuente: Elaboración propia .....	82
<i>Figura 24.</i> Mapa de coberturas año 2004. Fuente: Elaboración propia.....	83
<i>Figura 25.</i> Mapa de coberturas año 2007. Fuente: Elaboración propia.....	84
<i>Figura 26.</i> Mapa de coberturas año 2015. Fuente: Elaboración propia.....	86
<i>Figura 27.</i> Mapa de cambios de coberturas años 2004 a 2007. Fuente: Elaboración propia .....	87
<i>Figura 28.</i> Mapa de cambios de coberturas años 2007 a 2015. Fuente: Elaboración propia .....	88
<i>Figura 29.</i> Mapa de cambios de coberturas años 2004 a 2015. Fuente: Elaboración propia .....	89
<i>Figura 30.</i> Áreas de coberturas para 2004, 2007 y 2015 en las ortofotografías. Fuente: Elaboración propia .....	90
<i>Figura 31.</i> Cambios de coberturas entre 2004, 2007 y 2015 en las ortofotografías. Fuente: Elaboración propia .....	92
<i>Figura 32.</i> Índice NDVI. Fuente: Elaboración propia.....	94
<i>Figura 33.</i> Índice BU. Fuente: Elaboración propia .....	95
<i>Figura 34.</i> Variación de áreas para cobertura bosque y antrópica según índices. Fuente: Elaboración propia .....	96
<i>Figura 35.</i> Número de predios vereda Pantanillo. Fuente: Elaboración propia. ....	99

Figura 36. Distribución de predios en vereda Pantanillo entre 2010 y 2017. Fuente: Elaboración propia. ....	100
Figura 37. Número de predios vereda Las Palmas. Fuente: Elaboración propia. ....	101
Figura 38. Distribución de predios en vereda Las Palmas entre 2010 y 2017. Fuente: Elaboración propia. ....	102
Figura 39. Cobertura año 1993, Secretaria de Medio Ambiente Envigado. Fuente: Elaboración propia a partir de Secretaria de Medio ambiente Envigado, 2013 .....	104
Figura 40. Cobertura año 2006, Secretaria de Medio Ambiente Envigado. Fuente: Elaboración propia a partir de Secretaria de Medio ambiente Envigado, 2013 .....	106
Figura 41. Cobertura año 2013, Secretaria de Medio Ambiente Envigado. Fuente: Elaboración propia a partir de Secretaria de Medio ambiente Envigado, 2013 .....	107
Figura 42. Áreas de las coberturas según estudio de Secretaria de medio ambiente y según la investigación en curso. Fuente: Elaboración propia .....	108
Figura 43. Línea de tendencia de la cobertura antrópico. Fuente: Elaboración propia.....	110
Figura 44. Línea de tendencia de la cobertura antrópico. Fuente: Elaboración propia.....	110
Figura 45. Comparación clasificación del suelo POT 2001 y coberturas Ortofotografía 2004. Fuente: Elaboración propia .....	115
Figura 46. Comparación clasificación del suelo POT 2011 y coberturas Ortofotografía 2015. Fuente: Elaboración propia .....	116

## Lista de tablas

Tabla 1 .....	22
Tabla 2 .....	24
Tabla 3 .....	24
Tabla 4 .....	31
Tabla 5 .....	38
Tabla 6 .....	44
Tabla 7 .....	45
Tabla 8 .....	47
Tabla 9 .....	52
Tabla 10 .....	53
Tabla 11 .....	53
Tabla 12 .....	55
Tabla 13 .....	55
Tabla 14 .....	57
Tabla 15 .....	60
Tabla 16 .....	61
Tabla 17 .....	62
Tabla 18 .....	64
Tabla 19 .....	65
Tabla 20 .....	68
Tabla 21 .....	68
Tabla 22 .....	71
Tabla 23 .....	72
Tabla 24 .....	74
Tabla 25 .....	76
Tabla 26 .....	78
Tabla 27 .....	90
Tabla 28 .....	93
Tabla 29 .....	96
Tabla 30 .....	98
Tabla 31 .....	98
Tabla 32 .....	103
Tabla 33 .....	109



## Lista de ecuaciones

(Ecuación I).....	29
(Ecuación II) .....	29
(Ecuación III) .....	30
(Ecuación IV).....	31
(Ecuación V).....	44
(Ecuación VI).....	48

## Resumen

El municipio de Envigado ha presentado una fuerte actividad constructora en los últimos años debido a la buena calidad de vida que ofrece, lo cual ha generado cambios en el uso del suelo y una alta presión sobre el territorio. En este proyecto se analizó el caso particular de las veredas Pantanillo y Las Palmas (27,66 km<sup>2</sup>) que corresponden a la zona más distante del casco urbano.

Para ello se hizo un análisis cuantitativo de los cambios en las coberturas de tierra que han ocurrido durante el periodo de 1997 a 2016. Se realizó un análisis multitemporal por teledetección, teniendo como insumos básicos tres ortofotografías y ocho imágenes satelitales tipo Landsat. Como método se empleó una clasificación supervisada luego de hacer las correcciones necesarias a las imágenes. Como resultados se pudo verificar que las coberturas boscosas y los pastos han presentado una disminución de sus áreas, y ha ocurrido un leve aumento de áreas con construcciones.

Se revisaron los Planes de Ordenamiento Territorial (POT) para los años 2001 y 2011, y se concluye que en el municipio ya estaba contemplado el cambio de actividades para estas zonas rurales, en donde los usos del suelo están planteados como agrícolas, pero también para el uso habitacional y recreacional.

**Palabras clave:** Teledetección, POT, Coberturas de tierra, Envigado, Pantanillo, Las Palmas.

### **Abstract**

The municipality of Envigado has had a strong activity in terms of construction in the recent years due to the high quality life that this town offers. All this has triggered in the land use and high pressure over the territory. This Project analyzed in particular the rural areas of Pantanillo and Las Palmas (27,66 km<sup>2</sup>), which are the most peripheral parts of the town centrality.

For this purpose a quantitative analysis was made of the Land coverage changes that have taken place between 1997 and 2016. A multi-temporal analysis via teledetection was made considering basic inputs such as three orthophotographs and eight satellite landsat images. As a method a supervised classification was carried out after the necessary images correction were made. As a result it was possible to verify that the forest coverage and the pasture have presented a decrease in the area and on the other hand we have notice an increase in the construction area.

Land development plans were studied years 2001 through 2011 and as a result we conclude that the municipality was already contemplating a usage change for these rural areas in which land usage was planned for agricultural, housing, and recreational purposes.

**Keywords:** Teledetection, Land development plans, Land cover, Envigado, Pantanillo, Las Palmas.

## 1 Introducción

Observar los cambios y el crecimiento acelerado de las grandes urbes en el mundo representa una actividad importante en el ordenamiento del paisaje y en la administración de los recursos presentes en el territorio, ya que las dinámicas poblacionales representan las variables más críticas para el desarrollo y planeamiento económico futuro, así como para la administración ambiental y de recursos naturales de un determinado lugar (Liu y Yang, 2015; Fusilli, Marzialetti, Laneve y Santilli, 2014). Así, monitorear el desarrollo de las actividades productivas es relevante para medir el impacto sobre los recursos naturales, los cuales son indispensables para el adecuado desarrollo de la sociedad moderna, pero cuyo aprovechamiento desmedido puede llevar a agotarlos a escala local, regional y mundial (García, Amarilla, Rodas y Echeverría, 2017). Recientemente, con las exigencias ambientales y sociales y con la presión del crecimiento poblacional, el hombre es más consciente de su papel en la conservación de la naturaleza y ha dirigido su mirada a hacer un manejo adecuado del uso del suelo y de las coberturas de tierra. Estas se definen como la cobertura superficial resultado de una asociación de elementos que pueden expresarse como elementos antrópicos, vegetación, materiales rocosos y cuerpos de agua (Di Gregorio y Jansen, 2000).

Actualmente se emplean diferentes fuentes de información como base en los estudios sobre coberturas y uso del suelo, los cuales permiten establecer posibles patrones de asentamiento y monitorear su comportamiento y variación en el tiempo (Quiasua, Corredor y Puentes, 2016). Unas de las herramientas más empleadas en los últimos tiempos son las técnicas de teledetección, las cuales permiten analizar el territorio en diferentes fechas y representan un aporte único para examinar y describir fenómenos como el crecimiento, la forma y el tipo de ocupación de territorio etc., debido a su amplia distribución y su amplia implementación en la toma de decisiones (García *et al*, 2017). El empleo de Sensores Remotos ligados a los Sistemas de Información Geográfica (SIG), constituyen una herramienta valiosa en el modelamiento de la distribución humana (Lung, Lübker, Ngochoch y Schaab, 2013) y la evaluación de recursos ambientales (Pernia y López 2001), particularmente en los estudios de uso de la tierra y cambios en las coberturas (Walsh, Davis y Peet, 1994). Estos dispositivos son apreciados especialmente

porque permiten realizar una caracterización visual total del área de interés, aun en lugares de difícil acceso, y posibilitan trabajar con diferentes escalas espaciales y temporales. Es así como la teledetección representa un gran apoyo para otros métodos tradicionales, como los inventarios físicos de elementos naturales o culturales y el trabajo de observación en campo.

Una de las virtudes del empleo de la teledetección es la posibilidad de realizar estudios que involucran el tiempo como son los análisis multitemporales, los cuales integran imágenes de diferentes fechas (Sacristán, 2006) y permiten estudiar fenómenos siguiendo su dinámica y sus modificaciones como, por ejemplo, los análisis dinámicos de coberturas terrestres y uso de suelo, los cuales constituyen un sustento para estimar otro tipo de procesos originados por actividades humanas o naturales como son la desertificación, pérdida de biodiversidad, degradación y deforestación (Tengil, Franco, Nava y Ordoñez, 2015). En este tipo de análisis se estudia el terreno con imágenes de diferentes intervalos de tiempo con suficiente resolución temporal y espacial, de tal manera que pueda hacerse una asertiva identificación de coberturas. En estos estudios se emplean diferentes metodologías como: la diferencia de imágenes, el análisis de componentes principales o los índices (Diez y Mazzoni, 2016; Chuvieco, 1998; Riaño, 2002; Parra, 2014). En la interpretación se realiza un acople de coberturas o usos de suelo a una clasificación convencional y se define una leyenda. La comparación de imágenes con formas diferentes de clasificación exige elaborar una misma leyenda temática con el fin tener una base homogénea para la comparación. Esta base es de suma importancia para la generación de tablas comparativas para la observación de la evolución de las coberturas permitiendo observar los estados iniciales y actuales (Muñoz, Rodríguez y Romero, 2009). Así mismo, la definición de las diferentes coberturas analizadas en los diferentes estudios, está en función del grado de separabilidad que puede conseguirse mediante los estadísticos aplicables durante las diferentes etapas del proceso de mejoramiento, es por ello que, al aumentar considerablemente el número de posibles clases, el error aumenta ampliamente (Palomino y Anaya, 2014).

Gran parte de los análisis multitemporales de cambios de cobertura evalúan el impacto sobre la cobertura boscosa, especialmente por causa de actividades antrópicas. En Colombia se observa que la primera causa de deforestación es la frontera agropecuaria, seguida de la colonización y la construcción de obras e infraestructura (Parody y Zapata, 2015). Así, estos cambios en coberturas son indicadores de la presión sobre el uso de la tierra (Rodríguez, 2011).

En torno a este tema, las distintas instituciones estatales han realizado diversos mapas de coberturas para el territorio colombiano, como por ejemplo los mapas de coberturas, uso y ocupación del territorio hechos en 1996 por el IDEAM mediante el procesamiento de 67 imágenes Landsat (Aulló, 2013). Entre los años 2000- 2002 y 2005-2009, el IDEAM y el SINA (Sistema Nacional Ambiental), el IGAC (Instituto Geográfico Agustín Codazzi) y el Sistema de Parques Nacionales Naturales (SPNN) elaboraron mapas de coberturas para Colombia (Aulló, 2013). Entre 2000-2002 y 2005-2007, el departamento de Risaralda elaboró mapas de coberturas de los parques naturales Los Nevados, el macizo del Tatamá y el Santuario de Fauna y Flora Otún Quimbaya (Parody y Zapata, 2011). En el 2011 el IDEAM y el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Territorial elaboraron el “Análisis de tendencias y patrones especiales de deforestaciones Colombia” (Parody y Zapata, 2011). Particularmente, en el municipio de Envigado en el año 2013, la Secretaria de Medio Ambiente y Desarrollo Agropecuario realizó la actualización del mapa de coberturas vegetales, el análisis multitemporal y la métrica del paisaje del municipio de Envigado, en la cual empleó ortofotografías y trabajo de campo para el intervalo de 1993 al 2013.

Además de los mapas oficiales, también se han hecho varios estudios que emplean como insumo base los análisis de coberturas obtenidos de sensores remotos como en Ciudad Bolívar (Quiasua *et al*, 2016), en Villavicencio (Rodríguez, 2011), en Paipa (Riaño, 2002) y Bogotá (Mendoza y Etter 2002), en los que se concluye que la fragmentación o pérdida de las coberturas vegetales naturales se genera por el cambio del uso del suelo, la expansión de la zona urbana y la sobreexplotación de los recursos.

En general, estos estudios de interpretación de coberturas pretenden simplificar las diferentes superficies que pueda haber, agrupándolas en clases homogéneas bien diferenciadas (Pozzobon 2001) para finalmente realizar un mapa de coberturas que sirva de base para deducir los usos del suelo y analizar si hubo cambios o no en un territorio. En este tipo de estudios los elementos disponibles para la observación y la interpretación de coberturas son los softwares específicos en SIG (Arcgis y Qgis) y en procesamiento de imágenes satelitales (Envi, Erdas), las ortofotografías, las fotografías aéreas, las imágenes satelitales (Landsat, NOAA, SPOT, Ikonos, Rapideye) y las imágenes de radar, además de los datos de estudios anteriores.

Este trabajo de investigación tiene como base la pregunta: ¿Cómo ha cambiado el uso del suelo en las veredas Pantanillo y Las Palmas del municipio de Envigado desde 1997 a 2017 y cómo es su correspondencia con lo propuesto en los POT del 2001 y 2011? Para desarrollar una explicación razonable a este planteamiento se ha tomado como herramienta técnica la teledetección, esta ciencia soportada sobre los Sistemas de Información Geográfica siendo el complemento natural para este entorno, potenciando con ello los resultados y sus interpretaciones. Como insumos básicos se contó con ocho imágenes satelitales de acceso gratuito para los usuarios y adquiridas de misiones del programa espacial de Landsat desarrollado por la NASA, el cual tiene amplia penetración y uso a nivel mundial. Como segunda fuente de información primaria se contó con un set de tres ortofotografías tomadas en el territorio analizado durante diferentes periodos de tiempo. Ambas fuentes son complementarias entre sí, dado que las imágenes satelitales, por su rapidez, alta temporalidad en la consecución de la información en relación con los vuelos programados y su costo nulo, se pueden emplear en la generación de tendencias del comportamiento de las variables estudiadas en el análisis multitemporal para el intervalo de tiempo propuesto, las cuales pueden ser refinadas y validadas con la ayuda de las fotografías aéreas tomadas localmente. Se emplearon los métodos de análisis multitemporal de cambios en coberturas boscosas a partir de clasificación supervisada (Chuvienco, 2005; Parra, 2014), los índices NDVI (Chuvienco, 1995; Jensen, 1996) y BU (Diez y Mazzoni, 2016). Además, se empleó información predial del municipio para los últimos años y se compararon los resultados obtenidos con la información obtenida por la Secretaria del Medio Ambiente en su estudio del 2013.

Las veredas analizadas en el presente estudio corresponden a Las Palmas y Pantanillo, pertenecientes a la zona rural del municipio de Envigado. En ellas se presenta un efecto de borde en el sentido de Ramírez (2007), claro y marcado a pesar de estar alejadas de la zona urbana principal de Envigado consolidada en el Valle de Aburrá, la cual está conformada por Medellín, Barbosa, Girardota, Copacabana, Bello, Envigado, Itagüí, Sabaneta, La Estrella y Caldas.

En los últimos años el municipio de Envigado experimentó una dinámica de crecimiento acelerada, acentuada por la gran actividad edificadora para usos comerciales y residenciales, centrada en fincas de recreo y uso habitacional de estratos altos. Ya desde el 2001 hasta el 2003 se observaba un incremento de 202 a 505 en licencias para construcción, de 807 a 2926 en

unidades y un incremento en el área de 40.009 a 363.493 metros cuadrados (Municipio de Envigado, 2005), dinámica que continúa en aumento. Este desarrollo se ha visto potenciado por los elevados niveles de calidad de vida que lo hacen atractivo para los habitantes de municipios vecinos (Municipio de Envigado, 2005), por la buena capacidad económica de sus nuevos pobladores y, probablemente, por el enriquecimiento de algunos sectores de la población asociadas al narcotráfico. Basta recordar que desde hace un cuarto de siglo el Valle de Aburrá ha tenido una fuerte presencia de bandas delincuenciales y de narcotráfico (Cadavid, Restrepo, Insuasty, Balbín y Fernández, 2009). Es así como Envigado presenta el valor del metro cuadrado más alto en el Valle de Aburrá para desarrollos asociados a fincas de recreo, parcelaciones campestres y condominios, alcanzando entre 2001 y 2007 un aumento en el valor del 304% (DAP, Medellín e INER, 2012). Se resalta el hecho de que la población del municipio ha presentado un aumento considerable, pasando de 113.226 habitantes en el año 1990 a 222.355 en el año 2015, lo que representa un incremento del 49,1% en 25 años; contando en la actualidad con un total de 232.854 habitantes. Este incremento poblacional se ha traducido en una mayor presión sobre los recursos naturales, a pesar de que en las zonas rurales se evidencie una tendencia decreciente en la cantidad de habitantes (Contraloría Municipal de Envigado, 2015).

Las zonas rurales del municipio de Envigado se han constituido un área de interés para una porción de la población interesada en una nueva forma de habitar el campo. Este interés se ha convertido en motivo de preocupación para los habitantes de las veredas pues, a pesar de que la zona conserva su carácter rural (Alcaldía de Envigado, 2011), estas áreas se encuentran fuertemente parceladas y han sido dispuestas para la construcción de fincas de recreación, dejando de lado las actividades que han sido desarrolladas históricamente en estas zonas, como son las actividades agrícolas o pecuarias. El nuevo uso de la tierra afecta las actividades productivas y el arraigo de los pobladores, los cuales a pesar de reconocer en este una oportunidad para posicionarse como polo de desarrollo fundamentado en actividades ecoturísticas que podrían generar nuevas oportunidades de empleo a los pobladores, estos nuevos empleos serían en oficios varios, labores domésticas o en venta de frutas en los peajes, teniendo en cuenta la limitación de los ingresos que puedan obtener con otro tipo de trabajo y la limitación en la disposición de la tierra para ejercerlo (Herrera, 2018). Además, los campesinos también encuentran una fuente de preocupación en el hecho de que la nueva población de estrato alto que



llegue a habitar la zona provoque un incremento en el valor del suelo que los obligue a desplazarse a otros lugares (Palacio y Serna, 2016).

Actualmente, en la zona rural, los sistemas productivos campesinos ocupan el territorio junto a sistemas de producción empresarial con especulación inmobiliaria, creciente valor del suelo, nuevos habitantes y expansión urbana (Secretaría de Medio Ambiente y Desarrollo Agropecuario Envigado, 2015), lo cual propicia la afectación del suelo (Contraloría Municipal de Envigado, 2015), disminuye la disponibilidad del agua y genera alteraciones en los ecosistemas (Secretaría de Medio Ambiente y Desarrollo Agropecuario Envigado, 2015), de tal manera que se hace indispensable:

...mantener el equilibrio urbano-rural que garantice la sostenibilidad del territorio ante la constante presión por los usos urbanos del suelo que pone en primer plano funciones de la ruralidad de Envigado como borde Metropolitano, en tanto a: el equilibrio del territorio, el equilibrio ecológico, la seguridad alimentaria, la recreación, la reconstrucción cultural y el desarrollo del capital social (Secretaría de Medio Ambiente y Desarrollo Agropecuario Envigado, 2015, p.17).

Por todo lo planteado, es fundamental realizar un mejor planeamiento urbano y rural que permita dar orden y atender las falencias con el fin de utilizar de mejor manera los recursos urbanos y naturales.

Esta problemática social y ambiental que se viene presentando en la zona rural de Envigado, particularmente en las veredas Las Palmas y Pantanillo, está presente en las opiniones del colectivo, pero no hay una medida tangible o un estudio oficial realizado por las entidades públicas del municipio que permita establecer cómo ha cambiado el uso del suelo a lo largo del tiempo para estas veredas y por qué no se ha contemplado la medida de este cambio en los POT realizados. Con el desarrollo de esta investigación se pretende cuantificar y cualificar desde la teledetección el cambio en las coberturas, analizando especialmente la relación entre la cobertura boscosa, de pastos y antrópica como respuesta a la ecuación entre crecimiento urbanístico con pérdida de cobertura boscosa. También se busca rastrear los elementos e incumplimientos presentes en los POT que han llevado a estas dos veredas a presentar la situación de presión sobre el recurso suelo, debido a la activa actividad inmobiliaria.

Este documento se concibe como una herramienta para el escrutinio de la correcta aplicación de las normativas municipales vigentes y para el estudio del impacto que estas

generan en el entorno. Esta discusión es de gran importancia dado que cada día el ser humano toma más conciencia de la valiosa relación que tiene con el entorno natural que lo rodea, así como de las consecuencias que ocurren al exponer el entorno a cambios antrópicos y las interacciones de estos con las relaciones presentes en la naturaleza. Las sociedades día a día se movilizan en pro de la mejora en la calidad de vida de los individuos que la conforman, estos, con el fin de motivar este cambio, elevan sus umbrales de tolerancia controlando el uso desmedido y no sustentable de los recursos naturales finitos con los que cuentan, los cuales son en gran parte altamente sensibles a los cambios y cuentan con resiliencias muy bajas para asimilar estas constantes perturbaciones, que afectan finalmente sus características. El presente estudio plantea la utilización de fuentes de información primaria y secundaria en la aplicación de una metodología para el desarrollo temático que provea al ciudadano las herramientas necesarias para que analice críticamente los acuerdos municipales y sus implicaciones en el territorio habitado, promoviendo que este ejerza un control político sobre los dirigentes y las instituciones estatales, proveyendo además instrumentos para mejorar la concepción que tiene del entorno en los espacios democráticos establecidos por las normas y que así se promueva una discusión crítica que se tenga en cuenta en la toma de decisiones.

## **2 Objetivos**

### **2.1 Objetivo general**

Evaluar el cambio en las coberturas de tierra observadas para las veredas Pantanillo y Las Palmas del municipio de Envigado entre los años 1997 y 2016 con base en el análisis multitemporal de ortofotografías e imágenes satelitales, con el fin de verificar su correspondencia con lo definido en los Planes de Ordenamiento Territorial del municipio de los años 2001 y 2011.

### **2.2 Objetivos específicos**

Diseñar e implementar una metodología de caracterización de imágenes satelitales a través de índices espectrales y que permita la estimación de los cambios en las coberturas de tierra mediante un análisis multitemporal.

Validar la metodología propuesta mediante la comparación de los cambios de las coberturas de la tierra obtenidas con respecto a los POT del municipio y a la estructura predial de las veredas estudiadas.

Implementar una metodología para la clasificación de los cambios de coberturas de tierra usando imágenes aerotransportadas para el mejoramiento de la resolución espacial en estudios de detalle.

### 3 Marco teórico

En este capítulo se presentan los presupuestos teóricos en los que se sustenta el desarrollo, los análisis y las conclusiones de este estudio. Inicialmente se presentan las ideas y fundamentos de la teledetección, posteriormente se ilustra el concepto de Plan de Ordenamiento Territorial (POT), previsto en la legislación colombiana, para luego considerar las nociones de cobertura vegetal y uso del suelo. Finalmente se expone el concepto de borde, entendido como territorio dinámico contiguo al área urbanizada.

#### 3.1 Principios y fundamentos de la teledetección

La teledetección es una herramienta de aparición relativamente reciente, la cual permite adquirir datos de la superficie terrestre desde sensores instalados en plataformas aeroespaciales como aviones, satélites, radares y naves espaciales, entre otros (Chuvienco, 1995). Con esta técnica se obtiene información de diferentes partes del espectro electromagnético, propiedades de fenómenos, objetos o materiales, a través de un dispositivo tecnológico sensible que permite que ocurra una interacción entre el terreno y un sensor sin contacto físico y bajo vigilancia. (Khorram, Koch, Van Der Wiele, Nelson, 2012).

La teledetección se basa en la medición de la energía electromagnética (EM) que interactúa con la superficie de la tierra (Short, 2010; Khorram *et al*, 2012). Todo cuerpo con temperatura irradia energía electromagnética en diferentes longitudes de onda. Según la teoría ondulatoria la energía electro-magnética se transmite en el espacio, mediante un modelo armónico y continuo, a la velocidad de la luz ( $c=299.792.458$  m/s) y tiene dos campos de fuerzas perpendiculares entre sí: eléctrico y magnético. Las características de este flujo se definen como longitud de onda ( $\lambda$ ) y frecuencia (F), así a mayor longitud de onda, o menor frecuencia, el contenido energético será menor o viceversa (Chuvienco, 1995).

El espectro electromagnético se refiere a todo el rango de longitudes de onda, y va desde los rayos gamma hasta las ondas de radio. El espectro electromagnético se divide en regiones de acuerdo con la longitud de onda, de esta manera: la luz visible que se encuentra dentro del rango de sensibilidad espectral del ojo humano, los rayos cósmicos, gamma ( $\gamma$ ), los rayos X, ultravioleta, infrarrojo (que se divide en infrarrojo próximo, medio y térmico), microondas y ondas de radio (Parra, 2014), como se muestra en la Figura 1.

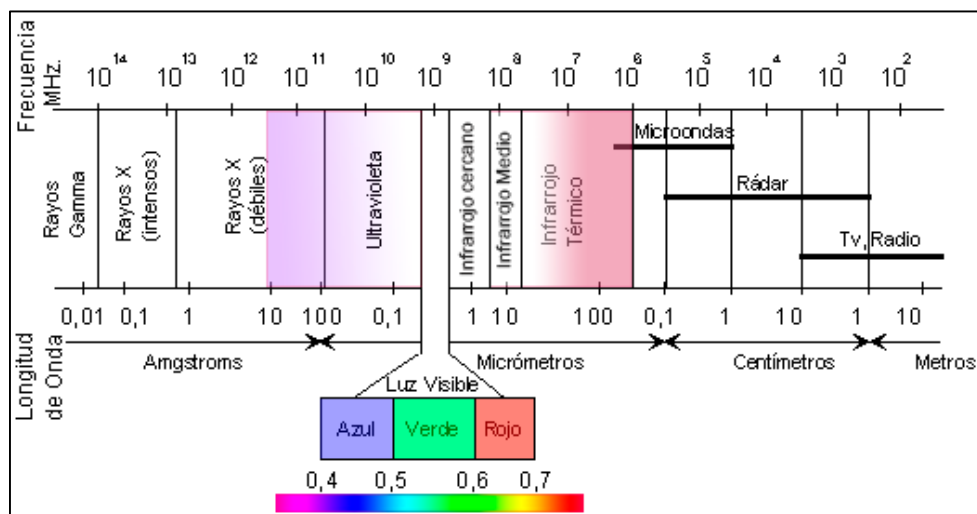


Figura 1. Espectro electromagnético. Fuente: Chuvieco (1995)

En la teledetección, se resaltan las siguientes bandas espectrales (Chuvieco, 1995), presentadas en la Tabla 1

Tabla 1

*Bandas más empleadas*

Banda	Característica
Azul (0,4 a 0,5 $\mu\text{m}$ )	Se denomina así por tratarse de la una radiación electro-magnética que pueden percibir nuestro ojo. Suelen distinguirse tres bandas elementales.
Verde (0,5 a 0,6 $\mu\text{m}$ )	
Rojo (0,6 a 0,7 $\mu\text{m}$ )	
Infrarrojo cercano (IRC) (0,7 a 1,3 $\mu\text{m}$ )	Resulta de especial importancia por su capacidad para discriminar masas vegetales y concentraciones de humedad.
Infrarrojo medio (1,3 a 8 $\mu\text{m}$ ),	En esta región se entremezclan los procesos de reflexión de la luz solar y de emisión de la superficie terrestre.
Infrarrojo lejano o térmico (IRT) (8 a 14 $\mu\text{m}$ )	Incluye la porción emisiva del espectro terrestre.
Microondas (a partir de 1 mm)	Con gran interés por ser un tipo de energía bastante transparente a la cubierta nubosa.

Fuente: Chuvieco (1995)

Un sistema de teledetección espacial incluye una fuente de energía, una cubierta terrestre, un sistema sensor, un sistema de recepción-comercialización, un intérprete y un usuario final (Chuvieco, 1995). Los sensores se pueden clasificar en pasivos o activos, dependiendo de la emisión o no de energía. Los pasivos captan la energía proveniente del sol que reflejan los objetos o que es emitida por la superficie terrestre, de ellos se obtienen imágenes satelitales y fotografías aéreas. Los sensores activos generan y emiten su propia energía, la cual posteriormente es reflejada por la tierra y captada por el sensor. Dentro de estos se encuentra la tecnología LiDAR y radar (Chuvieco, 1995; Jensen, 1996), como se muestra en la Figura 2. En el presente trabajo se emplearon como sensores remotos imágenes satelitales del sensor Landsat y ortofotografías.

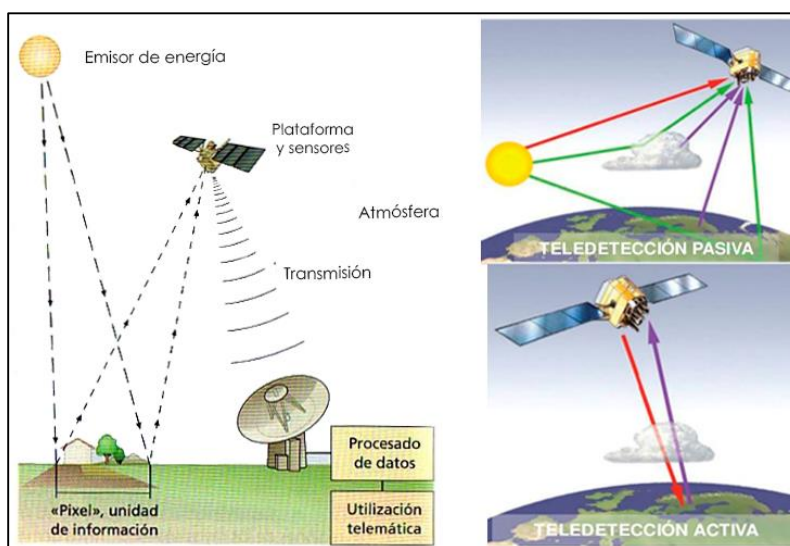


Figura 2. Sistema de teledetección. Fuente: Adaptación propia a partir de Chuvieco (1995)

Las imágenes Landsat son gratuitas y están disponibles para el público en general. Según el USGS, el programa Landsat fue ideado en la década de los 60 para el monitoreo de los recursos terrestres. Desde entonces se han sucedido una serie de satélites con los cuales se siguen observando de forma ininterrumpida (Parra, 2014). En la Tabla 2 se presentan los rangos del espectro de los sensores de los satélites activos y desprogramados del programa Landsat, y en la Tabla 3 se presentan sus principales características.

Tabla 2  
Rangos del espectro de los sensores de satélites Landsat.

Misión	Sensor	Resolución m	Banda 1 nm	Banda 2 nm	Banda 3 nm	Banda 4 nm	Banda 5 nm	Banda 6 nm	Banda 7 nm	Banda 8 nm	Banda 9 nm	Banda 10 nm	Banda 11 nm
L 1	RBV	80	475-575	580 - 680	690-830								
	MSS	57x79				500-600	600-700	700-800	800-1100				
L 2	RBV	80	475-575	580 - 680	690-830								
	MSS	57x79				500-600	600-700	700-800	800-1100				
L 3	RBV	80	475-575	580 - 680	690-830								
	MSS	57x79				500-600	600-700	700-800	800-1100				
L 4	TM	30 - 120	450-520	520-600	630-690	760-900	1550-1750	10400- 12500	2080- 23500				
	MSS	57x79				500-600	600-700	700-800	800-1100				
L5	TM	30 - 120	450-520	520-600	630-690	760-900	1550-1750	10400- 12500	2080- 23500				
	MSS	57x79				500-600	600-700	700-800	800-1100				
L7	ETM+	15-30-60	450-520	520-600	630-690	770-900	1550-1750	10400- 12500	2080- 23500	520-900			
L8	OLI	15-30	430-450	450-510	530-590	640-670	850-880	1570-1650	2110-2290	500-680	1360- 1380		
	TIRS	100										10600- 1119	11500- 125100

OLI=Operational Land Imager, TIRS=Thermal Infrared Sensor, MSS=Escaner Multi-Espectral, TM=Thematic Mapper, ETM+ =Enhanced Thematic Mapper Plus, RBV= Return Beam Vidicon

Fuente: USGS, 2017

Tabla 3  
Características de los satélites Landsat

Landsat	Fecha lanzamiento	Fecha Finalización	Heliosincrono	Altitud km	Angulo	Re visita	Cruce ecuatorial
1	23/07/1972	05/01/1978	Sí	917	99.2	18 días	9:30 am +/- 15 min
2	22/02/19802	27/07/1983	Sí	917	99.2	18 días	9:30 am +/- 15 min
3	22/02/19802	7/09/1993	Sí	917	99.2	18 días	9:30 am +/- 15 min
4	16/07/1982	1983	Sí	705	98.2	16 días	9:45 am +/- 15 min
5	01/03/1984	En operación	Sí	705	98.2	16 días	9:45 am +/- 15 min
6	05/10/1993	3/10/1993		No logro la órbita de servicio			
7	15/04/199	En operación	Sí	705	98.2	16 días	10:00 am +/- 15 min
8	11/02/2013	En operación	Sí	705	98.2	16 días	10:00 am +/- 15 min

Fuente: USGS, 2017

### 3.1.1 Correcciones de la imagen.

Las imágenes tomadas desde cualquier tipo de plataforma (aerotransportada, satelital, aeronaves remotamente tripuladas) poseen una serie de errores inherentes al proceso de adquisición de la información, por lo tanto, el producto generado no es una fiel representación del área capturada. Esto afecta la calidad de la información en formas de tono, posición y tamaño de los objetos que constituyen la escena (Chuvieco, 1995), por este motivo debe hacerse su post procesamiento para mejorar y tratar de recrear las condiciones reales al momento de la toma de información. Las imágenes satelitales pueden presentar distorsión por la rotación de la tierra, distorsiones inherentes al sensor, distorsiones por la interacción del tren de ondas con la atmósfera y distorsiones propias de la misión satelital, como expuso Mather (1987). Estas distorsiones se ilustran en la Figura 3.

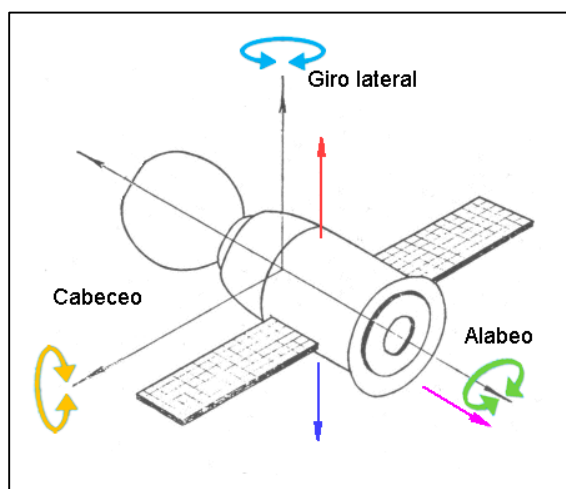


Figura 3. Distorsiones de la misión satelital en los ejes X, Y Z. Fuente: Elaboración propia.

#### 3.1.1.1 Corrección radiométrica.

La corrección radiométrica está diseñada para solucionar los problemas mecánicos del sensor al momento de la adquisición, los cuales ocurren comúnmente por pérdida de información en un pixel o en una o varias líneas, por averías en el sensor (Chuvieco, 1995).



### ***3.1.1.2 Corrección geométrica.***

La corrección geométrica está diseñada para la corrección espacial de los píxeles que componen la imagen, disminuyendo las distorsiones presentes en esta al ser tomada y presentando una matriz con unas coordenadas georreferenciadas estándar. La importancia de esta corrección radica en que genera un producto georreferenciado adecuado para el desarrollo de estudios multitemporales.

### ***3.1.1.3 Corrección atmosférica.***

El objetivo de la corrección atmosférica es atenuar la distorsión de la radiancia que finalmente capta el sensor del satélite y que no corresponde a la parte de la superficie terrestre analizada, pues la radiación electromagnética se ve afectada al momento de ser atravesada por la energía solar debido a que se generan efectos de absorción y dispersión de la señal causada por partículas presentes en la columna atmosférica (Chuvieco, 1995). El proceso de esta corrección permite pasar los valores de cada píxel de niveles digitales (ND valores en bruto) a niveles de reflectancia captadas por el sensor en la parte superior de la atmósfera.

## **3.1.2 Clasificación de imágenes.**

En la clasificación, cada píxel de una imagen se asigna a una categoría particular en un conjunto de categorías de interés ayudando a convertir los datos espectrales originales en un mapa temático sencillo. Estas técnicas generan procesos en las escenas permitiendo refinar los productos, pasando de imágenes crudas a una serie de productos cartográficos temáticos con mayor información relevante para el entendimiento de procesos presentes (Vicens, 2009). El proceso de clasificación de imágenes se divide en dos grandes grupos, a saber: clasificación supervisada y clasificación no supervisada. A continuación, se describen estas técnicas y algunos de sus posibles métodos empleados para obtenerlas.

### ***3.1.2.1 Clasificación supervisada.***

Es un proceso por el cual se emplea una serie de algoritmos y reglas, partiendo de unas regiones de interés (o de entrenamiento lo más homogéneamente posibles) generadas, las cuales son conocidas con anterioridad y que servirán para conocer la firma espectral del área de estudio.

Con estas áreas, y seleccionando los algoritmos, se generan unas clases. A continuación, se describen los principales métodos empleados en esta clasificación:

#### *3.1.2.1.1 Mínima distancia*

Este método toma como base la estimación de la mínima distancia (distancia euclidiana) al centroide estimado del conjunto de píxeles de la clase de estudio. Geométricamente estas clases generan una serie de hiperesferas a las que se les toma la mínima distancia. El píxel será asignado al conjunto cuya distancia sea menor (Monterroso, 2013).

#### *3.1.2.1.2 Paralelepípedos.*

En este método se definen una serie de paralelepípedos (hiperparalelepípedos, los cuales están en  $R^n$ , siendo  $n$  el número de bandas presentes en la imagen base de estudio) que definen las fronteras de cada clase. Un píxel incógnito es clasificado dependiendo del paralelepípedo al cual se inscribe. La definición de cada uno de los paralelepípedos debe hacerse teniendo en cuenta los valores máximos y mínimos de reflectividad para cada una de las bandas, pero pueden presentarse píxeles que quedan sin clasificar, representan otras clases que no se han tenido en cuenta o bien resultan demasiado complejos para adjudicarlos a una clase.

#### *3.1.2.1.3 Máxima verosimilitud.*

Este método parte de tener una muestra de reflectividad para cada clase y cada banda. Puede calcularse la media y la desviación típica de cada una de las clases, y utilizar algún modelo de distribución de probabilidad. El clasificador de máxima probabilidad asume que los datos siguen una función de distribución normal (Khorram *et al*, 2012) para asignar la probabilidad de que un píxel cualquiera pertenezca a una de las clases determinadas. De este modo, el píxel se asigna a la clase a la que es más probable que pertenezca. Este método puede usarse a pesar de que la hipótesis de que los datos de reflectividad siguen una distribución normal no siempre se cumpla, por lo que se debe tener cuidado en su implementación.

#### *3.1.2.1.4 Mahalanobis.*

Este método es muy similar al método de mínima distancia, pero tomando la distancia de Mahalanobis, la cual tiene en cuenta la variabilidad de clases (dispersión de

clases) y la correlación de píxeles. La figura generada no es una hiperesfera (la cual está en  $R^n$ , siendo  $n$  el número de bandas presentes en la imagen base de estudio). La localización, forma y tamaño de las elipses reflejan la media, varianza y covarianza de los datos.

### **3.1.2.2 Clasificación no supervisada**

Las clasificaciones no supervisadas guardan relación con el valor relativo al color, al tono o al *clúster* (grupo o agrupamientos), tomados para identificar entidades. Esta forma de clasificación implica poca aportación del usuario antes del proceso de clasificación, este trabajo se realiza mediante un proceso computarizado iterativo que asigna píxeles en una imagen a grupos particulares, que representan agrupaciones naturales de píxeles que son espectralmente similares en las bandas de imagen. Después de este proceso de agrupamiento, el analista decide en qué clase del esquema de clasificación seleccionado pertenece cada grupo (Khorram *et al*, 2012).

### **3.1.2.3 Post clasificación.**

La post clasificación es un proceso empleado al final del proceso de clasificación de las imágenes, por los métodos supervisado o no supervisado, con el cual se busca dar una refinación al modelo original entregado por el clasificador seleccionado. Según Khorram *et al* (2012), una parte importante de procesos pueden ser aplicadas a las imágenes procesadas y clasificadas. Entre las operaciones típicas en este estadio están la aplicación de filtros, la evaluación de precisión y la detección de cambios.

### **3.1.2.4 Análisis de Minoría/Mayoría.**

Este método permite editar el arreglo de la matriz de píxeles presentes buscando que aquellos píxeles solitarios adquieran la clasificación de la clase que los rodea, con el fin de alcanzar la mayor uniformidad y respetando la tendencia general de las áreas clasificadas. Para ello, los píxeles solitarios son ingresados una matriz de Kernel y el píxel central en el Kernel será reemplazado con el valor de clase que tiene la mayoría de los píxeles que lo componen (Envi, 2018).

### 3.1.3 Índices.

Para detectar un aspecto específico de la superficie terrestre, se pueden usar índices que utilicen alguna combinación de las bandas y hagan una transformación de las mismas, aumentando las diferencias de reflectancia y facilitando la interpretación (Jensen, 1996).

#### 3.1.3.1.1 Índice NDVI (*Índice normalizado de vegetación*).

Es el índice más empleado para realzar la vegetación en función de su respuesta espectral y sirve para estimar la cantidad, calidad y desarrollo de la vegetación. Presenta valores entre -1 y 1, siendo los números positivos las zonas con vegetación (Jensen, 1996). Para su cálculo se emplean las bandas correspondientes al infrarrojo y al rojo del espectro electromagnético (Chuvienco, 1995; Jensen, 1996), y se tiene en cuenta la diferencia de la reflectancia entre las bandas correspondientes al infrarrojo cercano (IR cercano) y al rojo, dividido por la suma de estas dos bandas de reflectancia, como se indica a continuación:

(Ecuación I)

$$NDVI = \frac{(IRCercano - ROJO)}{(IRCercano + ROJO)}$$

#### 3.1.3.1.2 Índice BU (*Índice de área construida*).

El índice de área construida, según He *et al* (2010) citado en Diez y Mazzoni (2016), nos indica el grado de urbanización de un área. Es obtenido a partir del NDBI o índice normalizado de diferencia construida (Zha *et al*, 2003, citado en Diez y Mazzoni, 2016) y del NDVI, e involucra al Infrarrojo medio (IR Medio), al Infrarrojo Cercano (IR cercano) y al rojo, como se indica en la siguiente ecuación:

(Ecuación II)

$$BU = NDBI - NDVI$$

Donde,

(Ecuación III)

$$NDBI = \frac{(IRMedio - IRCercano)}{(IRMedio + IRCercano)}$$

### 3.1.4 Validación de la clasificación de imágenes

Para validar los métodos de clasificación se propone emplear la matriz de confusión y el coeficiente Kappa (Parra, 2014).

#### 3.1.4.1 *Matriz de confusión.*

Ninguna clasificación puede considerarse completa hasta que su grado de exactitud sea evaluado. Este puede definirse como el grado de concordancia entre las clases asignadas por el clasificador y sus ubicaciones correctas según datos recolectados por el usuario (regiones de interés), considerados como datos de referencia.

La matriz de confusión permite calcular los errores de omisión (que corresponden a los píxeles que debieron ser clasificados dentro de una categoría, pero finalmente quedaron en otra categoría), de comisión (Palomino y Anaya, 2014), y la precisión general entre el mapa clasificado y los datos de referencia. La matriz presenta una forma cuadrada de tamaño  $n \times n$ , donde  $n$  es el número de clases desarrolladas para el estudio. La primera serie (las columnas conciernen a los datos de referencia) corresponde a datos de referencia adquiridos en las regiones de interés, y la segunda serie (las filas conciernen a las asignaciones del clasificador) corresponde a la categorización de los píxeles, realizada por el clasificador para las clases de interés.

### 3.1.4.2 Coeficiente de validación kappa o índice kappa (k).

Índice estadístico de confiabilidad que mide la concordancia entre dos clasificaciones de imágenes: el mapa clasificado-realidad observado y el que cabría esperar simplemente por azar (Parra, 2014; Congalton y Green, 2009). Se calcula siguiendo la siguiente ecuación:

(Ecuación IV)

$$K = \frac{n \sum_{i=1}^n X_{ii} - \sum_{i=1}^n X_{i+} X_{+i}}{n^2 - \sum_{i=1}^n X_{i+} X_{+i}}$$

Donde  $n$  es el tamaño de la muestra,  $X_{ii}$  el acuerdo observado y el producto de los marginales ( $X_{i+}$ ,  $X_{+j}$ ), acuerdo esperado en cada categoría  $i$ . El acuerdo observado aparece en la diagonal de la matriz, mientras el esperado nos rige para calcular el ajuste entre mapa clasificado y realidad que puede deberse al azar. El índice  $K$  permite evaluar si la clasificación ha discriminado las categorías de interés con una exactitud significativamente mayor a la que se hubiera obtenido con una asignación aleatoria. El valor de  $K$  varía de 0 a 1 y un mayor índice Kappa indica una mejor clasificación, así un valor cercano a 0 sugiere que el acuerdo observado se debe al azar (Parra, 2014). Un coeficiente de 0.9 significa que la clasificación es 90% mejor que la confiabilidad esperada, afectando aleatoriamente una clase de cobertura a los polígonos (Mas, 1999). Cerda y Villarroel (2008) dividen este índice en seis clases (como se muestra en la Tabla 4) y según la clasificación, se acepta o rechaza.

Tabla 4

*Categorías de concordancias de validación para el coeficiente Kappa*

Rango	Concordancia
0	Nula
0.01 - 0.02	Leve
0.21 - 0.40	Aceptable
0.41 - 0.60	Moderada
0.61 - 0.80	Considerable
0.81 - 1.00	Casi perfecta

Fuente: Cerda y Villarroel, 2008

### 3.2 Plan de Ordenamiento Territorial (POT) de Envigado

En el Título XI “De la organización territorial” de la Constitución Política de Colombia de 1991, se planteó la creación de una ley de Ordenamiento Territorial que implementara lineamientos sobre el manejo territorial de la nación ajustados a cada territorio y que terminara con la fragmentación legislativa del Ordenamiento Territorial del país (Botero, Palacios y Castrillón, 2005). Esta ley se denominó Ley de Desarrollo Territorial o Ley 388 de 1997 (del 18 de julio) y en su primer artículo, numeral dos, establece que un municipio puede ejercer su autonomía con respecto al ordenamiento de su territorio, el uso del suelo, la preservación del patrimonio ecológico y cultural, la prevención de desastres y la ejecución de acciones urbanísticas eficientes. Así, todos los municipios del país de acuerdo con sus características, tamaño y población establecen distintos tipos de planes (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2004).

El municipio de Envigado, como ente territorial, sigue la ley 388 de 1997 para abordar el tema del ordenamiento, con una visión prospectiva, bajo un modelo que permita la participación activa de toda la comunidad tanto en la toma de decisiones como en el seguimiento y control de los recursos y las actuaciones gubernamentales (Botero *et al*, 2005). Así, de acuerdo a su población (232.854 habitantes en 2017), este municipio se rige mediante Planes de Ordenamiento Territorial (POT), los cuales son planteados para municipios con población superior a 100.000 habitantes, y que según la normativa tienen vigencia de 12 años (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2004). Este municipio ha formulado dos POT, uno en el año 2001 y el vigente del año 2011.

Estos planes representan una herramienta básica de acción física y administrativa con objetivos ambientales, económicos y sociales para el territorio y las comunidades que participan de su construcción (Alcaldía de Medellín, 2005). En particular, uno de sus componentes básicos es el uso del suelo. En el POT vigente para Envigado, el título IV está destinado a los usos del suelo y tiene en cuenta los siguientes aspectos: usos del suelo, densidades y aprovechamientos en el suelo rural, criterios para la reglamentación de los usos del suelo rural, reglamentación de usos, uso de cobertura vegetal, uso forestal, usos establecidos en el suelo rural y usos especiales (Alcaldía de Envigado, 2011).

Osorio y Ángel (2005) analizaron el POT del 2001 y observaron que la mayoría de usos que se ha dado al suelo corresponden a los determinados por el POT, y que este uso está influenciado por determinantes sociales y económicos de los habitantes del municipio, por sus ideales, sus necesidades y las expectativas de los mismos. Lopera (2006) también analizó el POT del 2001 y concluyó que en Envigado existía una carencia de herramientas de certificación ambiental que permitieran un control previo sobre los desarrollos constructivos públicos y privados, herramienta que debería estar a cargo de la Secretaría de Medio Ambiente y Desarrollo Rural del municipio. El municipio de Envigado, a diferencia de la mayoría de los municipios del país, posee una delegación de funciones ambientales por parte de la Corporación Autónoma Regional del Centro de Antioquia (Corantioquia) autorizada por la ley 99 de 1993, de la cual hacía poco uso a pesar de contar con las delegaciones para ejercer la autoridad ambiental en materia de expedición de licencias, permisos, concesiones, etc. (Lopera, 2006). Por su estructura administrativa, al interior del municipio trabajaban de manera independiente y poco coordinada la Secretaría de Obras Públicas y la Secretaría de Medio Ambiente, situación que fue aprovechada por algunas empresas constructoras en el momento de existir una denuncia por afectar los recursos naturales. Algunas de las facultades otorgadas a la municipalidad eran tramitar solicitudes de licencias ambientales, de concesiones de aguas, permiso de emisiones atmosféricas, permiso de ocupación de cauce, permiso de aprovechamiento forestal, expedición de salvoconductos de fauna y flora, y solicitudes de adhesión a los convenios de producción más limpia, suscritos con el gremio porcicultor.

### **3.3 Cobertura y uso del suelo**

La cobertura de la tierra y el uso del suelo son conceptos relacionados, pero claramente diferentes. Mientras la cobertura de tierra se refiere a la cubierta bio-física que se observa sobre la superficie de la tierra, expresada en términos de vegetación, elementos antrópicos existentes sobre la tierra, superficies terrestres como afloramientos rocosos y cuerpos de agua (Di Gregorio y Jansen, 2000), el uso del suelo se refiere a la utilidad que presta un tipo de cobertura al ser humano, a las actividades y acciones que las personas ejecutan sobre una superficie para producir, modificarla o mantenerla (FAO, 1997a; FAO/UNEP, 1999). Así, el uso se relaciona con las actividades antrópicas o funciones económicas de una porción específica de la tierra como el uso urbano o industrial, de reserva natural, etc. (Di Gregorio y Jansen, 2000). El



conflicto en el uso del suelo se presenta cuando el uso actual no corresponde al uso potencial del mismo, es decir, que las exigencias hechas a la cobertura vegetal establecida son diferentes a la capacidad natural ofrecida por el suelo, la cual se puede ver afectada (disminuida) por procesos naturales como la erosión, las capacidades de infiltración de agua, factores naturales como la pendiente, el origen y la composición del suelo, el clima etc. Con el uso potencial del suelo se puede tomar decisiones que potencien y aprovechen mejor el suelo y sus recursos en el desarrollo de la agricultura, ganadería, silvicultura y desarrollo urbano, así como el establecimiento de áreas de conservación de recursos naturales (CVC, 2010).

En el año 2004, se adaptó para Colombia la metodología europea para el uso de tierras denominada *Corine Land Cover* como respuesta a la necesidad de estandarización y de contar con información actualizada, monitoreada y confiable para la denominación de coberturas. En la Figura 4 se presenta dicha adaptación para la leyenda nacional de coberturas de tierra en Colombia.

LEYENDA NACIONAL DE COBERTURAS DE LA TIERRA - COLOMBIA	
<b>1. TERRITORIOS ARTIFICIALIZADOS</b>	<b>3. BOSQUES Y ÁREAS SEMINATURALES</b>
<b>1.1. Zonas urbanizadas</b>	<b>3.1. Bosques</b>
1.1.1. Tejido urbano continuo	3.1.1. Bosque denso
1.1.2. Tejido urbano discontinuo	3.1.1.1.1. Bosque denso alto de tierra firme
<b>1.2. Zonas industriales o comerciales y redes de comunicación</b>	3.1.1.1.2. Bosque denso alto inundable
1.2.1. Zonas industriales o comerciales	3.1.1.2.1. Bosque denso bajo de tierra firme
1.2.2. Red vial, ferroviaria y terrenos asociados	3.1.1.2.2. Bosque denso bajo inundable
1.2.3. Zonas portuarias	3.1.2. Bosque abierto
1.2.4. Aeropuertos	3.1.2.1.1. Bosque abierto alto de tierra firme
1.2.5. Obras hidráulicas	3.1.2.1.2. Bosque abierto alto inundable
<b>1.3. Zonas de extracción minera y escombreras</b>	3.1.2.2.1. Bosque abierto bajo de tierra firme
1.3.1. Zonas de extracción minera	3.1.2.2.2. Bosque abierto bajo inundable
1.3.2. Zonas de disposición de residuos	3.1.3. Bosque fragmentado
<b>1.4. Zonas verdes artificializadas, no agrícolas</b>	3.1.4. Bosque de galería y ripario
1.4.1. Zonas verdes urbanas	3.1.5. Plantación forestal
1.4.2. Instalaciones recreativa	<b>3.2. Áreas con vegetación herbácea y/o arbustiva</b>
<b>2. TERRITORIOS AGRÍCOLAS</b>	3.2.1.1. Herbazal denso
<b>2.1. Cultivos transitorios</b>	3.2.1.1.1.1. Herbazal denso de tierra firme no arbolado
2.1.1. Otros cultivos transitorios	3.2.1.1.1.2. Herbazal denso de tierra firme arbolado
2.1.2. Cereales	3.2.1.1.1.3. Herbazal denso de tierra firme con arbustos
2.1.3. Oleaginosas y leguminosas	3.2.1.1.2.1. Herbazal denso inundable no arbolado
2.1.4. Hortalizas	3.2.1.1.2.2. Herbazal denso inundable arbolado
2.1.5. Tubérculos	3.2.1.1.2.3. Arracachal
<b>2.2. Cultivos permanentes</b>	3.2.1.1.2.4. Helechal
2.2.1. Cultivos permanentes herbáceos	3.2.1.2. Herbazal abierto
2.2.1.1. Otros cultivos permanentes herbáceos	3.2.1.2.1. Herbazal abierto arenoso
2.2.1.2. Caña	3.2.1.2.2. Herbazal abierto rocoso
2.2.1.3. Plátano y banano	3.2.2.1. Arbustal denso
2.2.1.4. Tabaco	3.2.2.2. Arbustal abierto
2.2.1.5. Papaya	3.2.3. Vegetación secundaria o en transición
2.2.1.6. Amapola	<b>3.3. Áreas abiertas, sin o con poca vegetación</b>
2.2.2. Cultivos permanentes arbustivos	3.3.1. Zonas arenosas naturales
2.2.2.1. Otros cultivos permanentes arbustivos	3.3.2. Afloramientos rocosos
2.2.2.2. Café	3.3.3. Tierras desnudas y degradadas
2.2.2.3. Cacao	3.3.4. Zonas quemadas
2.2.2.4. Viñedos	3.3.5. Zonas glaciares y nivales
2.2.2.5. Coca	<b>4. AREAS HÚMEDAS</b>
2.2.3. Cultivos permanentes arbóreos	<b>4.1. Áreas húmedas continentales</b>
2.2.3.1. Otros cultivos permanentes arbóreos	4.1.1. Zonas Pantanosas
2.2.3.2. Palma de aceite	4.1.2. Turberas
2.2.3.3. Cítricos	4.1.3. Vegetación acuática sobre cuerpos de agua
2.2.3.4. Mango	<b>4.2. Áreas húmedas costeras</b>
2.2.4. Cultivos agroforestales	4.2.1. Pantanos costeros
2.2.5. Cultivos confinados	4.2.2. Salitral
<b>2.3. Pastos</b>	4.2.3. Sedimentos expuestos en bajamar
2.3.1. Pastos limpios	<b>5. SUPERFICIES DE AGUA</b>
2.3.2. Pastos arbolados	<b>5.1. Aguas continentales</b>
2.3.3. Pastos enmalezados	5.1.1. Ríos (50 m)
<b>2.4. Áreas agrícolas heterogéneas</b>	5.1.2. Lagunas, lagos y ciénagas naturales
2.4.1. Mosaico de cultivos	5.1.3. Canales
2.4.2. Mosaico de pastos y cultivos	5.1.4. Cuerpos de agua artificiales
2.4.3. Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales	<b>5.2. Aguas marítimas</b>
2.4.4. Mosaico de pastos con espacios naturales	5.2.1. Lagunas costeras
2.4.5. Mosaico de cultivos y espacios naturales	5.2.2. Mares y océanos
	5.2.3. Estanques para acuicultura marina

Figura 4. Leyenda de Coberturas de tierra para Colombia. Fuente: Ministerio de Ambiente (2010)

### 3.4 El concepto de borde

Suárez (2016) hace un recuento de las variaciones que el concepto “borde” ha tenido a la luz de diferentes autores. De este estudio se toman las nociones principales. El borde es entendido desde diferentes perspectivas: los autores Lynch (1959) y Proyr (1968) lo entienden como un límite, entre fases lineales de la continuidad para el primero, o como franja de contacto entre lo urbano y lo rural para el segundo. Ramírez (2007) habla de una franja variable que circunda la mancha urbana, es heterogénea y se presenta como un conjunto de diferencias según sea la urbanización y poblamiento. Según Suárez (2016), este autor incluye los cambios territoriales debido a las relaciones que involucran la complementariedad física, social y económica, pues corresponde a una franja dinámica en constante transformación definida por el uso, la ocupación y los ajustes socioculturales que este dinamismo genera. Ponds y Yeates (1994) proponen que según sean los intereses del propietario y comportamiento del mercado, la influencia del suelo en transición es indirectamente urbana y que este suelo en transición no es visible por no presentar un uso definido ante de su transformación (Suárez, 2016).

Suárez (2016) plantea que una de las características del borde es la heterogeneidad, y que este adquiere identidad por su papel en el territorio a partir de cuatro grupos de factores de formación: a) características sociales y culturales, b) infraestructura - servicios y condiciones ambientales, c) marco institucional y el régimen urbano, y d) el mercado inmobiliario.

Por características sociales y culturales, se entiende principalmente las particularidades de la población, su historia, el uso del territorio y del suelo. Por infraestructura, servicios y condiciones ambientales la autora entiende lo relacionado, en primera instancia, con las intervenciones antrópicas realizadas sobre el territorio como equipamientos, accesibilidad, movilidad, servicios públicos, y lo segundo lo relaciona con los rasgos ambientales naturales de este territorio. Por el marco institucional y el régimen urbano, la autora se refiere a toda la normativa formal y no formal existente, como los planes de ordenamiento territorial (POT).

Para la autora, al determinar las características de un área de borde es relevante analizar las dinámicas e intereses de los constructores y de las empresas inmobiliarias, así como cuál es la influencia que tienen en la normativa urbana. También es pertinente tener en cuenta la oferta, la demanda y la dinámica del mercado y los precios.

## 4 Descripción del área de estudio

### 4.1 Localización geográfica

El área de estudio comprende las veredas Las Palmas y Pantanillo, pertenecientes al área rural del municipio de Envigado. Dicho municipio se encuentra en la zona suroriental del Área Metropolitana del Valle de Aburrá, ubicado al noroccidente de la cordillera central de los Andes colombianos, en el departamento de Antioquia como muestra la Figura 5.

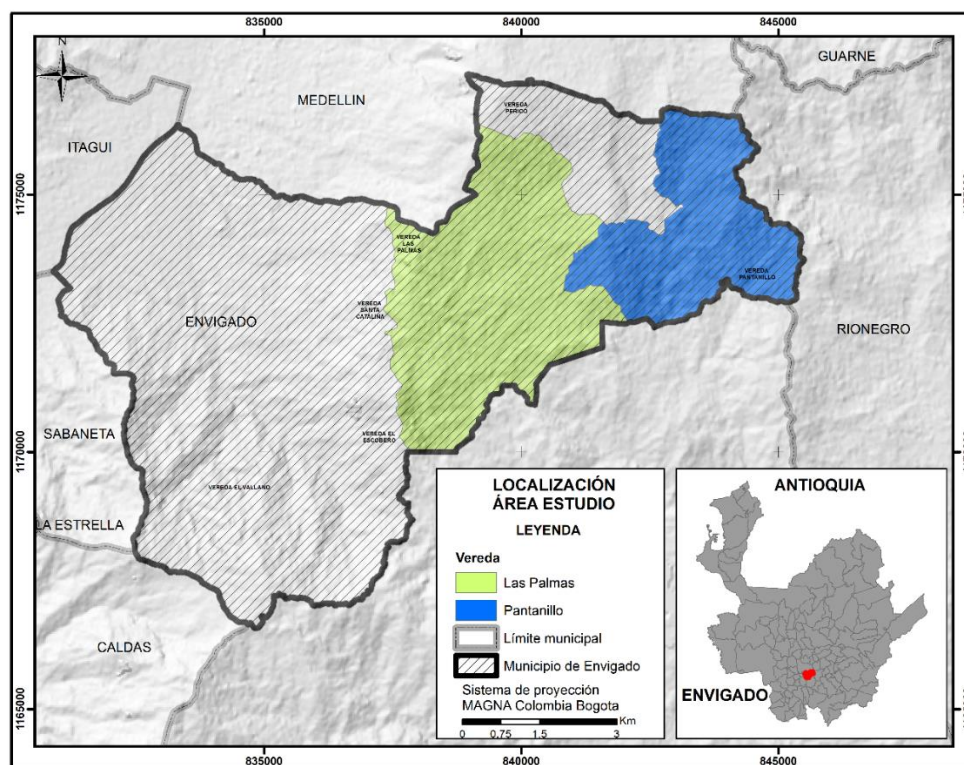


Figura 5. Ubicación del municipio de Envigado. Fuente: Elaboración propia

El área de estudio está comprendida entre las siguientes coordenadas, obtenidas con un sistema de proyección Conforme de Gauss con origen Bogotá, datum Magna:

827330 a 845515 m Este - 1170000 a 1176712 m Norte

Envigado limita con los siguientes municipios: al norte con Medellín, al sur con El Retiro, al este con Rionegro, al suroeste con Caldas y al oeste con Itagüí y Sabaneta. El área del presente estudio limita con los municipios de Rionegro, El Retiro y Medellín, y las veredas de Envigado: Perico, Santa Catalina y El Escobero.

## 4.2 Delimitación zonal

La unidad básica de planeación territorial en el municipio de Envigado es la *Zona* (Secretaría de Planeación Municipio de Envigado, 2006), la cual agrupa barrios y veredas. En total son 13 zonas: nueve zonas urbanas y cuatro zonas rurales. Las veredas analizadas en este estudio pertenecen a las zonas 12 y 13 como se relaciona en la Tabla 5. Envigado presenta en total 39 barrios en su zona urbana y 6 veredas: Pantanillo, Las Palmas, Perico, El Vallano, El Escobero y Santa Catalina.

Tabla 5  
*Zonas municipio de Envigado*

ZONA	BARRIOS/VEREDAS	ZONA	BARRIOS/VEREDAS
Zona 1	Las Vegas	Zona 7	Las Antillas, El Trianón, Loma del Barro, La Paz El Dorado
Zona 2	El Portal, San Marcos Jardines, Villa Grande Pontevedra Bosques de Zuñiga Las Orquídeas	Zona 8	Las Casitas, Primavera Milán de Vallejuelos Alcalá
Zona 3	Alto de Misael Las Flores, Uribe Ángel La Sebastiana	Zona 9	Mesa, Centro Los Naranjos Obrero, Bucarest La Magnolia
Zona 4	Zúñiga, El Esmeraldal Loma El Atravesado El Chocho	Zona 10	Vereda Santa Catalina Vereda El Escobero
Zona 5	La Inmaculada La Pradera, Loma de las Brujas	Zona 11	Vereda el Vallano
Zona 6	El Chinguí, El Salado La Mina, San Rafael San José	<b>Zona 12</b>	<b>Vereda Las Palmas</b>
		<b>Zona 13</b>	Vereda Perico <b>Vereda Pantanillo</b>

Fuente: Alcaldía de Envigado (2018)

### 4.3 Fisiografía.

Según la información cartográfica actual en formato *Shape* entregada por catastro municipal, Envigado comprende un área de 78,22 km<sup>2</sup> de los cuales 12,26 Km<sup>2</sup> conforman el área urbana y 65,96 km<sup>2</sup> el área rural. La vereda Pantanillo tiene un área de 10,30 km<sup>2</sup> y la vereda Las Palmas un área de 17,36 km<sup>2</sup>, es decir que el área de estudio total corresponde a 27,66 km<sup>2</sup>, esto es, un 35% del área total del municipio.

El clima de la vereda Pantanillo presenta una precipitación promedio de 1811 a 1874 mm/año, y la vereda Las Palmas de 1811 a 1987 mm/año. Ambas veredas tienen temperaturas promedio entre 15.3°C y 13.4°C en la parte alta (Secretaría de Medio Ambiente y Desarrollo Agropecuario Envigado, 2015). Envigado tiene características de las zonas de vida bosque húmedo montano bajo (bh-MB) y bosque muy húmedo montano bajo (bmh-MB), controlado básicamente por la altitud y la dirección de los vientos predominantes de norte a sur. El municipio cuenta con una humedad relativa del 70% (Alcaldía de Envigado, 2001).

Las dos veredas estudiadas, ubicadas en el oriente del municipio, comprenden alturas entre los 2228 msnm y los 2750 msnm, haciendo parte del altiplano de la cuenca del río Negro, denominado Altiplano Oriental, el cual se caracteriza por tener colinas de tope redondeado, pendientes cortas de cóncavas a rectas y un rango de variación de pendientes de 10 al 40% (Alcaldía de Envigado, 2001).

El municipio de Envigado presenta rocas cristalinas de tipo ígneo y metamórfico, y también depósitos recientes aluviales, de vertiente, de ceniza volcánica (Ingeominas, 2001). Particularmente en las veredas Las Palmas y Pantanillo se encuentran las siguientes unidades geológicas: Anfibolitas de Medellín (Tangarife y Castrillón, 2004; Ingeominas, 2001), Migmatitas del Retiro conocidas también como Migmatitas de Puente Peláez (González, 1980, Ingeominas, 2001) y Dunita de Medellín (Restrepo y Toussaint, 1974).

Con respecto a la hidrología, el área del presente estudio se encuentra en la microcuenca Las Palmas, cuyas aguas continúan su recorrido por el municipio de El Retiro, donde son represadas en el embalse de La Fe (Gaia, 2007). La Cuenca de la quebrada Las Palmas constituye un ecosistema de equilibrio debido a la demanda hídrica que se registra en la zona que

irriga, al uso inadecuado del suelo, a los grandes movimientos de tierra, a los afluentes contaminados por agroquímicos y a las aguas residuales. Esta cuenca está conformada por las veredas Las Palmas, Perico y Pantanillo. En la jurisdicción de Envigado se encuentran dos de sus principales afluentes: la quebrada Espíritu Santo y su afluente La Marta. Otros afluentes de menor importancia son La Morgan, Los Chachos, La Ahumada, La Meseta y El Rincón. La parte alta y media de la cuenca presenta un estado de conservación bajo debido a la intervención antrópica de toda la zona. La parte baja, a pesar de contar con menos intervención antrópica, presenta afectación. Se observan problemas de saneamiento en todos sus afluentes por coliformes, agroquímicos y sedimentos. La presencia de ganado de leche y carne y algunos cultivos evidencia erosión laminar (Gaia, 2007).

#### **4.4 Antecedentes históricos del municipio**

A comienzos del siglo XVII, en el territorio correspondiente a Envigado se presentaron los primeros asentamientos hispanos continuos, apareciendo poco a poco una constelación de villas campestres para vacaciones y fines de semana. En 1775 se creó la primera parroquia, denominada Santa Gertrudis, la cual dio comienzo al Envigado urbano (Sánchez y Mejía, 2002). Es así como se ordenó la destinación de los terrenos para el parque principal, la Iglesia y ocho vías centrales.

En 1814 fue erigido el municipio con el nombre de Envigado, y en sus inicios su actividad se limitaba a la de ser parte del camino real que unía a Medellín con Rionegro. Posteriormente, y a raíz de la construcción de la estación del Ferrocarril en 1911, el municipio vivió algunos cambios en su estructura (Alcaldía de Envigado, 2001).

En los años cuarenta se dio la migración hacia Envigado y empezaron darse cambios a nivel social, económico y cultural. Por tal motivo la fábrica de Rosellón construyó para sus empleados el barrio Obrero, el cual es un polo de desarrollo del sector oriental del municipio (Vitola, 2008).

En los años cincuenta, Envigado se convierte en una zona de producción y comercialización con algunas empresas destacadas como Pavezgo y Milán. Más tarde, se crean

Peldar, Grulla, Reisol, Curtiembres y La Bota del Día. Por otro lado, se construyeron andenes, se instalaron servicios públicos y se vendieron lotes para la formación del barrio Magnolia (Vitola, 2008).

En los años sesenta aparecen establecimientos de educación y aumenta la población universitaria, por lo que Envigado presenta una fuerte explosión demográfica, superior en algún tiempo a la del resto del Valle de Aburrá, lo cual genera una fuerte actividad constructora orientada básicamente por el sector industrial. Sin embargo, paralelo al crecimiento planificado se generarían también desarrollos de carácter espontáneo, alimentados en su gran mayoría por los procesos de violencia nacional. Poco a poco se urbanizaron otros terrenos que hoy hacen parte integral de la malla urbana, como el barrio El Dorado construido por el I.C.T. El auge constructor de los sesenta y los setenta se presenta en sectores como Andalucía y San Marcos al norte, y Alcalá 1 y 2 al Sur (Alcaldía de Envigado, 2011).

En los años 80 y 90 avanza el crecimiento urbano, creando nuevos desarrollos y consolidando un “boom” en el área de la construcción debido al poder adquisitivo y a la buena calidad de vida percibida en el municipio. En los últimos años la casi saturación del sector de El Poblado, en Medellín, lleva a los promotores privados a pensar en los terrenos homólogos de Envigado. Este hecho se hace más lógico después de la construcción de la Transversal Inferior y gracias a la presión de capitales privados y entidades financieras de vivienda. Envigado sufre, como Medellín, un proceso de especulación que se desencadena en la construcción de edificios en terrenos no aptos y en el aumento desmedido de las densidades en sectores pobres en infraestructura vial y de servicios. Hoy en día el gran reto del municipio es consolidar su política de autonomía en el manejo territorial y crear las bases para un crecimiento coherente y medurado (Vitola, 2008).

Históricamente la Administración Municipal se ha preocupado por conservar y proteger las zonas rurales mediante el manejo de densidades bajas e índices de ocupación adecuados, con miras a evitar la densificación con deficiencias de infraestructuras de servicios y de equipamiento colectivo (Alcaldía de Envigado, 2011).



## 5 Metodología

Esta investigación es de tipo cualitativo aplicada a un caso particular en el municipio de Envigado, Antioquia, específicamente en las veredas Pantanillo y Las Palmas. El desarrollo del estudio siguió los pasos presentados en el flujograma, presentado en Figura 6.

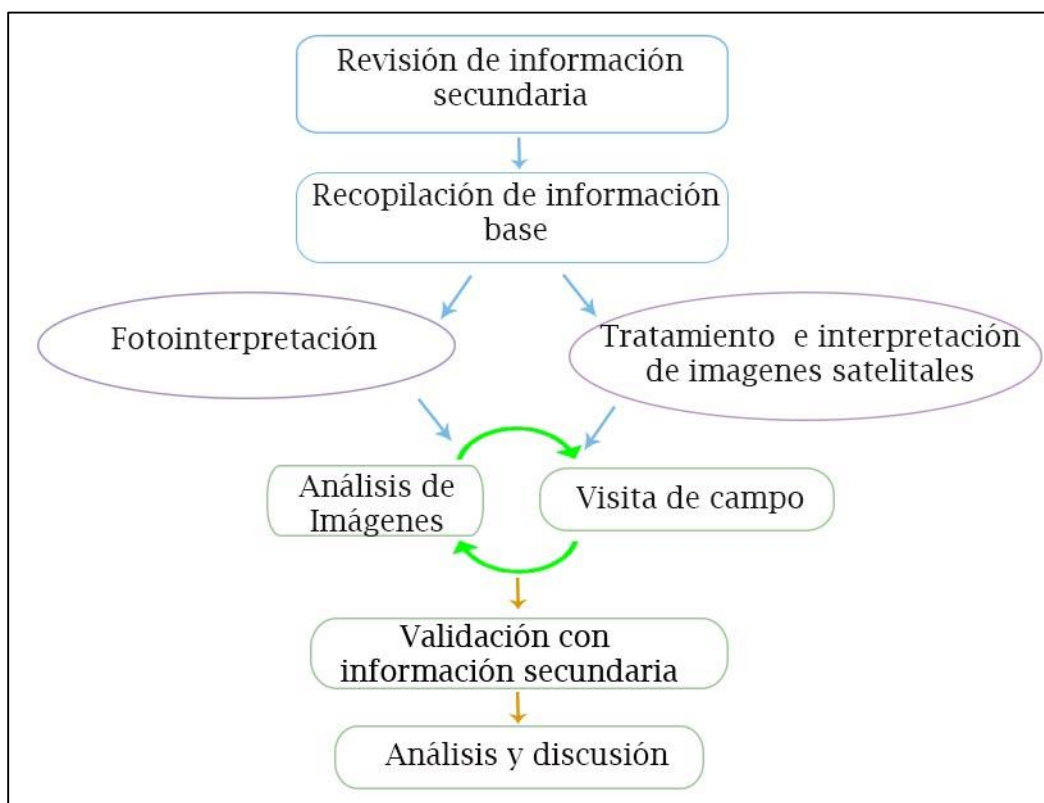


Figura 6. Metodología general. Fuente: Elaboración propia

**Revisión de información secundaria:** con el fin de obtener un conocimiento general del municipio, se revisó la literatura disponible, imágenes fotográficas históricas y la normativa legal vigente de las diferentes secretarías y departamentos administrativos del municipio (medio ambiente, obras públicas y planeación municipal).

**Recopilación de información base:** se obtuvo como base inicial la cartografía básica de la zona, imágenes satelitales, fotografías aéreas y los planes de ordenamiento territorial

formulados en los años 2001 y 2011. Gran parte de esta información fue proporcionada por el Departamento de Planeación del municipio de Envigado.

***Fotointerpretación, tratamiento e interpretación de imágenes satelitales:*** se realizó el tratamiento digital de las imágenes satelitales Landsat y la interpretación de las ortofotos, proceso que se explica en detalle más adelante.

***Análisis de imágenes:*** a partir de los resultados obtenidos en el ítem anterior, y con base en la información secundaria recopilada en el proyecto, se realizó el análisis cualitativo y cuantitativo de las ortofotografías interpretadas, y con las imágenes Landsat se realizó un análisis multitemporal que diera respuesta a las preguntas de investigación planteadas en el proyecto. Finalmente, con las imágenes Landsat se calcularon índices NDVI y BU.

***Visita de campo:*** se hizo un reconocimiento de campo en el área de estudio con el fin de tener una aproximación y un mejor conocimiento de la zona en la actualidad. A su vez se verificaron algunos puntos de la interpretación realizada para la última ortofotografía.

***Validación con información secundaria:*** se contó con un trabajo realizado por la Secretaria de Medio Ambiente y Desarrollo Agropecuario de Envigado en el 2016, en el cual hacen un análisis multitemporal de coberturas para los años 1993, 2006 y 2013. Con este estudio se validó la información analizada con las ortofotografías obtenidas y las imágenes descargadas.

***Análisis y discusión:*** una vez obtenidos todos los resultados, se procedió a realizar los análisis y los comparativos de la información primaria generada en el desarrollo de este trabajo con la información secundaria existente sobre el municipio, como POTs e información predial.

## **5.1 Escala de trabajo**

Durante el desarrollo de este trabajo de investigación se manejaron dos fuentes de información principales, basadas sobre la información descargada de las imágenes satelitales del programa Landsat y de las ortofotografías adquiridas durante diferentes periodos de tiempo por

el municipio de Envigado. Estas indican diferentes escalas de trabajo para el análisis multitemporal.

La resolución espacial del programa Landsat, con sus diferentes misiones espaciales actuales y culminadas, es de 30 metros para aquellas bandas multiespectrales empleadas. Esta resolución se puede ver mejorada empleando la técnica de fusión de imágenes con la banda pancromática incorporada para las misiones 7 y 8, pero dado que se están empleando las misiones 5, 7 y 8, y que la misión 5 no posee esta banda, no se pudo aplicar esta técnica para la mejora espacial de los píxeles. Por lo anterior se decidió trabajar con la misma resolución espacial de las bandas.

Por otro lado, la resolución espacial de las ortofotografías varía entre un rango de valores entre los 10 cm y 35 cm, lo cual genera aún más escalas de análisis para el proyecto ya que este está comprendido entre escalas regionales y locales de alto detalle.

La siguiente ecuación (Ecuación V) tomada de la página de ayudas de Arc Gis de ESRI, sirve para estimar la escala teórica de análisis:

(Ecuación V)

$$\text{Escala} = \text{Tamaño de celda} * 96/0.0254$$

Al aplicar esta ecuación, se generan las escalas contenidas en la Tabla 6.

Tabla 6.

*Escalas de trabajo*

<b>Escala teórica</b>	<b>Resolución espacial (m)</b>	<b>Fuente de información</b>
113386	30	Landsat
1323	0.35	Ortofotografía 2004
567	0.15	Ortofotografía 2007
378	0.1	Ortofotografía 2015

Fuente: Elaboración propia

## 5.2 Procesamiento de imágenes satelitales

El procesamiento de las imágenes satelitales es una actividad de gran importancia en la interpretación, dado que con estos procesos se asegura la eliminación de información anómala (ruido), la posible restauración de información perdida y la posible edición de errores generados durante la adquisición de la imagen o la transmisión de esta a las áreas de recepción.

Para el desarrollo del proyecto, inicialmente se obtuvieron imágenes satelitales que cubrieran el área de estudio correspondiente a las Veredas Las Palmas y Pantanillo del municipio de Envigado. Se emplearon las imágenes del programa gratuito Landsat, descargadas de la página <https://earthexplorer.usgs.gov/> con las coordenadas del centroide del municipio de Envigado (oeste  $-75.546704^{\circ}$  y norte  $6.154296^{\circ}$ ). Se seleccionaron imágenes de las misiones de Landsat 5, 7 y 8 que tuvieran un área de nubes inferior al 10% para el área de estudio. Las imágenes encontradas se presentan en la Tabla 7, y se encuentran entre los años 1997 y 2016.

Tabla 7.

### Listado de imágenes Landsat

Sensor Landsat	Fecha			Metadato	Nombre
	Año	Día Juliano	Día Gregoriano (AAAAMMDD)		
L5	1997	297	19971024	<a href="http://earthexplorer.usgs.gov/metadata/3119/LT50090561997297AAA02/">http://earthexplorer.usgs.gov/metadata/3119/LT50090561997297AAA02/</a>	L5_19971024
L7	2000	234	20000821	<a href="http://earthexplorer.usgs.gov/metadata/3372/LE70090562000234EDC00/">http://earthexplorer.usgs.gov/metadata/3372/LE70090562000234EDC00/</a>	L7_20000821
L7	2004	37	20040206	<a href="http://earthexplorer.usgs.gov/metadata/5441/LE70090562004037EDC01/">http://earthexplorer.usgs.gov/metadata/5441/LE70090562004037EDC01/</a>	L7_20040206
L7	2005	231	20050819	<a href="http://earthexplorer.usgs.gov/metadata/5441/LE70090562005231EDC00/">http://earthexplorer.usgs.gov/metadata/5441/LE70090562005231EDC00/</a>	L7_20050819
L7	2009	130	20090510	<a href="http://earthexplorer.usgs.gov/metadata/5441/LE70090562009130ASN00/">http://earthexplorer.usgs.gov/metadata/5441/LE70090562009130ASN00/</a>	L7_20090510
L8	2013	197	20130716	<a href="http://earthexplorer.usgs.gov/metadata/4923/LC80090562013197LGN00/">http://earthexplorer.usgs.gov/metadata/4923/LC80090562013197LGN00/</a>	L8_20130716
L7	2014	144	20140524	<a href="https://earthexplorer.usgs.gov/metadata/12267/LE70090562014144EDC00/">https://earthexplorer.usgs.gov/metadata/12267/LE70090562014144EDC00/</a>	L7_20140524
L7	2016	326	20161121	<a href="https://earthexplorer.usgs.gov/metadata/12267/LE70090562016326EDC00/">https://earthexplorer.usgs.gov/metadata/12267/LE70090562016326EDC00/</a>	L7_20161121

Fuente: Elaboración propia

Una vez obtenidas las imágenes para el análisis, se siguió con los procedimientos requeridos para el estudio, los cuales fueron:

1. Método de almacenamiento
2. Calibración radiométrica (conversión de niveles digitales a radiancia)
3. Corrección atmosférica

4. Re escalado de valores de radiancia (valores entre 0 y 1)
5. Restauración de sectores perdidos

### 5.2.1 Método de almacenamiento.

Para el almacenamiento de información en las imágenes satelitales se emplean tres métodos: la banda secuencia (*Band Sequential* BSQ por su sigla en inglés), en la cual los ND de la imagen se disponen seguidos hasta completar todos los píxeles de una banda; la banda intercalada por línea (*Band Interleaved by Line* BIL por su sigla en inglés), en la que los ND se organizan por líneas y no por bandas, siendo este es el formato requerido para el proceso en el entorno de ENVI. Finalmente, se emplea la banda intercalada por píxel (*Band Interleaved by Pixel* BIP por su sigla en inglés), donde las líneas se intercalan en cada píxel (Chuvieco, 1995). Los archivos BIL, BIP y BSQ son de tipo binarios y deben tener un archivo de encabezado tipo ASCII asociado, el cual contiene datos secundarios sobre la imagen como el número de filas y columnas en la imagen, la latitud y longitud etc. Para este caso de estudio las imágenes se almacenaron en BIL.

### 5.2.2 Calibración radiométrica (conversión de niveles digitales a radiancia).

Los valores de cada píxel que componen una escena representan la radiancia capturada por el sensor a bordo del satélite en un formato de nivel digital (cuyos valores corresponde a la resolución radiométrica del dispositivo tomando valores en el rango de  $[0 - (2^n - 1)]$ ). La conversión de los niveles digitales 'ND' a valores de radiancia absoluta es un procedimiento necesario para el análisis comparativo de varias imágenes tomadas por diferentes sensores (Chander, Markham y Helder, 2009). Debido a que cada sensor posee sus propios parámetros de calibración, dos imágenes tomadas con dos sensores diferentes pueden tener los mismos ND que representen dos valores diferentes de radiancia (Parra, 2014). Esto debido a que la energía (radiancia) llegada y captada por el sensor está regida por la irradiancia del sol, la reflectividad de la cubierta terrestre y de las condiciones intrínsecas del sistema para la captura de la información. Este proceso se realizó bajo el entorno del programa *ENVI 5.3*

### 5.2.3 Corrección atmosférica.

La corrección atmosférica es el paso siguiente en los pasos para la corrección y posterior interpretación. Este paso se origina por las diferentes distorsiones que se presentan al momento en el que el tren de ondas (energía lumínica) atraviesa la atmósfera terrestre y pasa por los procesos absorción y dispersión (causados por diversos vapores como el de agua o el del dióxido carbono, partículas en suspensión). Esta corrección se realiza con el módulo *FLAASH* (*Atmospheric correction model input parameters*, FLAASH por su sigla en inglés) del programa *ENVI 5.3*. A continuación, en la Tabla 8 se presentan los parámetros que se emplearon en este proceso.

Tabla 8

*Parámetros empleados en la corrección atmosférica de imágenes*

<b>Parámetro</b>	<b>Característica</b>
Elevación promedio del terreno Tipo de sensor	2.32354 km, que es la altura promedio del municipio de Envigado. Varía entre Landsat TM ( <i>Thematic Mapper</i> TM por su sigla en inglés), ETM ( <i>Enhanced Thematic Mapper Plus</i> ETM+ por su sigla en inglés) y OLI ( <i>Operational Land Imager</i> OLI por su sigla en inglés).
Fecha y hora del vuelo	Variable, pues fueron diferentes fechas.
Altura del sensor	El valor es de 705 km el cual es la altura determinada para la constelación de satélites Landsat 5, 7 y 8.
Longitud del centro de la escena	Debido a que fueron varias escenas estas varían localmente.
Modelo atmosférico	Se empleó el modelo tropical
Modelo de aerosoles	Debido a que el municipio presenta una fuerte urbanización se recurrió al modelo urbano.
Rango de visibilidad	Para este valor se buscó en los registros del IDEAM de la estación ubicada en el aeropuerto Olaya Herrera, con lo cual se pudo establecer las visibilidades para la mayoría de los días las cuales varían entre 9 y 15 km.

---

Fuente: Elaboración propia a partir de información de metadatos de imágenes Landsat.

#### 5.2.4 Re escalado de valores de radiancia (valores entre 0 y 1).

Una vez finalizada la corrección atmosférica, se procedió a reescalar los valores resultantes en una escala que varía en el rango de 0 a 1 para tener unos valores más fáciles de leer e interpretar. Para ello se recurrió a la siguiente fórmula, tomada de la página web de Landsat 8.

(Ecuación VI)

$$(Bx \leq 0) * 0 + (Bx \geq 10000) * 1 + (Bx \geq 0 \text{ and } B1 < 10000) * \text{float}(Bx)/10000$$

Dónde:

BX es la banda y su número en la composición

le significa menor o igual que ( $\leq$ )

ge significa mayor o igual que ( $\geq$ )

lt significa menor que ( $<$ )

Finalmente, se puede verificar que los valores se encuentren entre 0 y 1 mirando las firmas espectrales en cada imagen.

#### 5.2.5 Restauración de sectores perdidos

Por último, se realizó la corrección de algunas de las escenas del sensor Landsat 7, cuyas bandas presentaron una serie de sectores con alta pérdida de información. Para ello se descargó de la página web de ENVI la extensión Landsat *\_GAPFILL* bajo el entorno de ENVI 5.3, la cual completa estos vacíos de información. Así, se finalizan las correcciones de todas las escenas, quedando aptas para el proceso de clasificación supervisada.

#### 5.2.6 Clasificación supervisada.

La interpretación de una escena se realiza por los usuarios de imágenes satelitales ópticas, impulsados estos por las necesidades de conocimiento y entendimiento del entorno, además de por las características de esta tecnología como su rapidez de adquisición, facilidad de interpretación, amplio cubrimiento de superficie terrestre y la posibilidad de tener información de diversas fechas para la misma área. Para el desarrollo del presente estudio, se seleccionó la

metodología de clasificación supervisada (Chuvienco, 1995; Virtanen, Mikkola, Patova y Micula, 2002) dado que se basa en algoritmos propios del método seleccionado y del conocimiento de la zona.

Para iniciar con este proceso se parte de la imagen corregida obtenida en el proceso de corrección atmosférica anteriormente descrito. Para ello se siguieron los siguientes pasos:

1. Definición de las regiones de interés (ROI por su sigla en inglés). Para esto, se crearon inicialmente las siguientes categorías de coberturas de tierra:
  1. Antrópico (Territorios artificializados)
  2. Pastos (Territorios agrícolas)
  3. Cultivos (Territorios agrícolas) (la cual finalmente no se usó)
  4. Bosques - (Bosque denso, y Áreas con vegetación Herbácea)
  5. Tierras desnudas y degradadas
  6. Nubes
2. Al finalizar la selección de todas las semillas de cada cobertura seleccionada, se consultaron las estadísticas de separabilidad en la matriz de confusión con especial cuidado de revisar aquellas combinaciones con valores por debajo de 1.9, ya que los valores por debajo de 1.9 indican una separabilidad baja, los valores entre 1.9 y 2 indican una separabilidad adecuada y los valores de 2, una separabilidad idónea (Parra, 2014). Con este parámetro como guía se obtuvo que la cobertura de Cultivos presentaba valores significativamente bajos (menores a 1.4) con relación a las capas de suelo desnudo y de los pastos. Con esta información estadística, se decidió eliminar esta categoría y proceder con un modelo un poco más simple, pero con una mejor discriminación de las coberturas definidas para la interpretación.
3. Después de tener las regiones de interés adecuadas, se aplicaron 4 diferentes métodos de clasificación supervisada: mínima distancia, mahalanobis, máxima verosimilitud y paralelepípedo, obteniendo los mejores resultados con el método de *Mahalanobis*.
4. Al obtener el mapa clasificado inicial, se procedió con un posproceso de clasificación denominado análisis de minorías/mayorías (*Majority/Minority Analysis*, por su nombre en inglés), el cual analiza todos los píxeles y aquellos que no estén dentro de un matriz 3\*3 tipo Kernel los asigna a la cobertura predominante.



- Una vez obtenidos todos los productos de interpretación por el método de Mahalanobis, se procedió a estimar el *índice de kappa* generado en la matriz de confusión, con el cual se verificó la validez y la calidad de la clasificación supervisada.

En la Figura 7 se sintetiza la metodología aplicada en el tratamiento de imágenes satelitales.

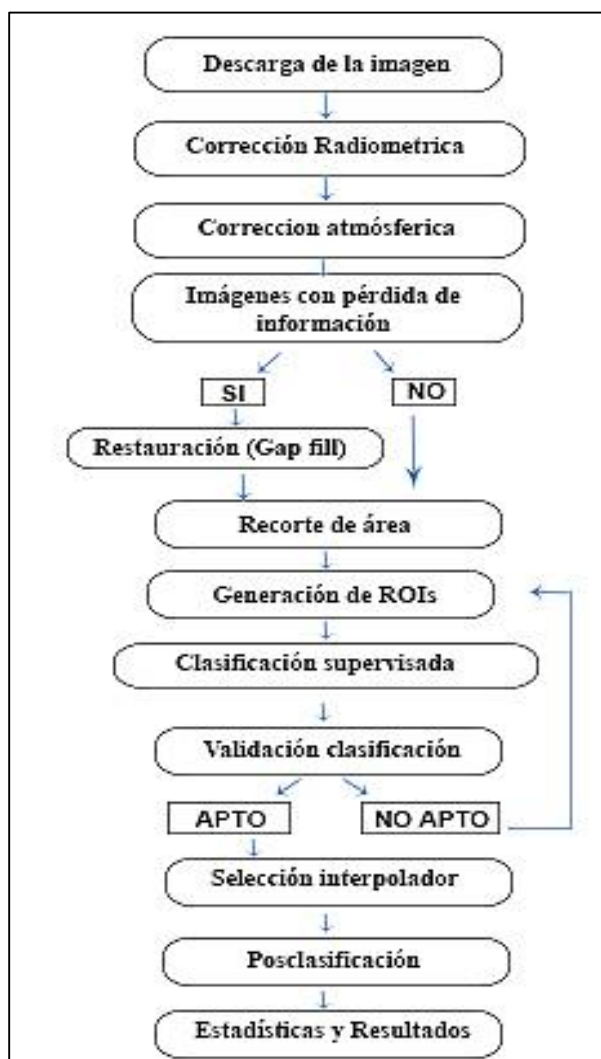


Figura 7. Metodología del tratamiento de imágenes satelitales. Fuente: Elaboración propia

### 5.2.7 Análisis dinámico de coberturas.

Para realizar la comparación de capas de coberturas en los diferentes años, se empleó la siguiente metodología desarrollada por SAG S.A. (Servicios Ambientales y Geográficos). Para ello se usó el programa *ArcGis 10.3*.

1. Una vez obtenidas las imágenes por clasificación supervisada, se edita cada imagen en su tabla de atributos.
2. Se reclasifican las coberturas asignando valores enteros pares, conservando un intervalo constante.
3. Se realiza un mapa dinámico que muestre las zonas con y sin cambio. Se emplea la operación igual a “= =”. Se obtienen valores de 0 para las zonas donde hubo cambio y 1 para las zonas donde no se evidencian cambios.
4. Luego, se usa la cobertura final o  $t_1$  y el raster de salida del punto anterior, los cuales se suman obteniendo números pares e impares. Los pares son píxeles que presentaron cambios y los impares los píxeles que no cambiaron.
5. Finalmente, se usa una combinación del raster del punto anterior con la cobertura inicial. Para ello se emplea el operador “COR”, obteniendo como resultado un raster con la información acumulada de los procesos anteriores y donde se aprecia la información original con el primer raster.
6. A partir de este resultado se generan unas tablas dinámicas en Excel, que permitan graficar y discutir los cambios presentados en el territorio en el intervalo temporal estudiado.

### 5.3 Procesamiento de ortofotografías

Con el fin de complementar el análisis de coberturas, se contó con tres ortofotografías proporcionadas por el municipio y cuyas características se relacionan en la Tabla 9. Estas ortofotografías tienen mejor resolución espacial que las imágenes satelitales Landsat empleadas

en la clasificación supervisada, por lo tanto, las categorías separadas están mejor delimitadas y permiten más detalle en su clasificación.

Tabla 9

*Listado de ortofotografías analizadas*

<b>Año</b>	<b>Tamaño pixel (cm)</b>	<b>Resolución espectral</b>	<b>Resolución radiométrica</b>	<b>Datum</b>
2004	35 x 35	1 banda	8 bits	D_Bogotá
2007	15 x 15	3 bandas	8 bits	Magna
2015	10 x 10	4 bandas	8 bits	Magna

Fuente: Elaboración propia

La clasificación de las coberturas presentes en las ortofotografías se logró mediante fotointerpretación y digitalización manual. De este tratamiento se obtuvieron las siguientes categorías:

1. Bosque
2. Cultivo
3. Pasto
4. Suelo desnudo
5. Antrópico

#### 5.4 Índices NDVI y BU

Como una herramienta adicional para el análisis del cambio en las coberturas más relevantes en el área de estudio, como la boscosa y antrópica, se aplicaron índices NDVI (Ecuación I) y BU (Ecuación II) construidos a partir de las diferentes bandas multiespectrales presentes en las imágenes Landsat, y los cuales sirven para evaluar la variación de las coberturas bosque y antrópica, respectivamente. Se analizaron seis imágenes Landsat, relacionadas en la Tabla 10, a las que fue posible aplicar los índices. Sobre las imágenes restantes no se pudieron aplicar, probablemente porque desde el principio eran imágenes defectuosas a las que se les hizo una restauración de sectores perdidos (*gap fill*). En la Tabla 11 se presentan las bandas tomadas para el cálculo de estos índices.

Tabla 10

*Listado de imágenes Landsat empleadas en el cálculo de índices*

Sensor		Fecha		Metadato	Nombre
Landsat	Año	Día Juliano	Día Gregoriano (AAAAMMDD)		
L5	1997	297	19971024	<a href="http://earthexplorer.usgs.gov/metadata/3119/LT50090561997297AAA02/">http://earthexplorer.usgs.gov/metadata/3119/LT50090561997297AAA02/</a>	L5_19971024
L7	2000	234	20000821	<a href="http://earthexplorer.usgs.gov/metadata/3372/LE70090562000234EDC00/">http://earthexplorer.usgs.gov/metadata/3372/LE70090562000234EDC00/</a>	L7_20000821
L7	2002	207	20020726	<a href="http://earthexplorer.usgs.gov/metadata/3372/LE70090562002207EDC00/">http://earthexplorer.usgs.gov/metadata/3372/LE70090562002207EDC00/</a>	L7_20020726
L8	2013	197	20130716	<a href="http://earthexplorer.usgs.gov/metadata/4923/LC80090562013197LGN00/">http://earthexplorer.usgs.gov/metadata/4923/LC80090562013197LGN00/</a>	L8_20130716
L7	2014	144	20140524	<a href="https://earthexplorer.usgs.gov/metadata/12267/LE70090562014144EDC00/">https://earthexplorer.usgs.gov/metadata/12267/LE70090562014144EDC00/</a>	L7_20140524
L7	2016	326	20161121	<a href="https://earthexplorer.usgs.gov/metadata/12267/LE70090562016326EDC00/">https://earthexplorer.usgs.gov/metadata/12267/LE70090562016326EDC00/</a>	L7_20161121

Fuente: Elaboración propia

Tabla 11

*Listado de bandas analizadas*

Sensor	Banda empleada para IR Medio	Banda empleada para IC Cercano	Banda empleada para el Rojo
Landsat 5	Banda 5	Banda4	Banda 3
Landsat 7	Banda 5	Banda4	Banda 3
Landsat 8	Banda 6	Banda 5	Banda 4

Fuente: Elaboración propia

## 6 Resultados

Para el desarrollo de este trabajo se contó con imágenes satelitales Landsat y con ortofotografías.

El procesamiento aplicado a las imágenes satelitales Landsat consistió en:

1. Hacer un tratamiento digital, es decir realizar una corrección atmosférica, una corrección radiométrica y una restauración de sectores perdidos para algunas imágenes con falta de información.
2. Realizar una clasificación supervisada de coberturas propuestas.
3. Hacer análisis dinámicos de estas coberturas.

El procesamiento aplicado a las ortofotografías consistió en:

1. Realizar la interpretación visual para obtener las coberturas propuestas.
2. Hacer análisis dinámicos de estas coberturas.

Con el análisis de imágenes satelitales y las ortofotografías se obtuvieron mapas de coberturas, mapas de cambios de coberturas en los intervalos de tiempo analizados y tablas en las cuales se relacionan áreas y porcentajes para cada cobertura, para los años en que se contó con imagen.

### 6.1 Validación de la clasificación supervisada

Como método de clasificación supervisada, se eligió a Mahalanobis sobre los métodos de Mínima distancia, Máxima verosimilitud y Paralelepípedo, pues sus índices kappa presentaron valores muy buenos, además de que la inspección visual fue la más acorde con lo esperado según

el conocimiento que se tiene de las veredas y las observaciones con las ortofotografías. En la Tabla 12 se relacionan los índices kappa obtenidos con los diferentes métodos

Tabla 12.

*Índices Kappa de las imágenes clasificadas*

<b>Imagen</b>	<b>Paralelepípedo</b>	<b>Máxima verosimilitud</b>	<b>Mínima distancia</b>	<b>Mahalanobis</b>
	<b>Índice Kappa</b>			
19971024	0,7047	0,9932	0,9745	0,9614
20000821	0,1433	1,000	0,9667	0,9572
20040206	0,1965	1,000	0,9811	0,9648
20050819	0,2886	0,9984	0,9984	0,9426
20090510	0,9946	0,9993	0,9730	0,9567
20130716	0,1825	0,9957	0,9745	0,9318
20140524	0,1760	0,9992	0,9841	0,9888
20161121	0,8439	1,000	0,9706	0,9700

Fuente: Elaboración propia

Como se indica en esta tabla, el índice Kappa arrojó valores entre 0,931 y 0,988, es decir, tienen una concordancia casi perfecta (0,81 – 1,00) (Cerde y Villarroel, 2008).

Otro método de cuantificar y comparar resultados es el cálculo de la matriz de confusión para cada una de las imágenes analizadas. Esta se presenta en la Tabla 13 y los valores en ella contenidas están en ha.

Tabla 13.

*Matriz de Confusión imágenes Landsat*

<b>IS/CS*</b>	<b>1997</b>					<b>Total</b>
	<b>Antrópico</b>	<b>Nube</b>	<b>Pastos</b>	<b>Suelo desnudo</b>	<b>Bosque</b>	
<b>Antrópico</b>	748	0	0	0	0	748
<b>Nube</b>	15	56	0	0	0	71
<b>Pastos</b>	4	2	677	5	2	692
<b>Suelo Desnudo</b>	8	0	4	377	0	389
<b>Bosque</b>	45	0	11	10	2488	2554
<b>Total</b>	820	58	692	392	2490	4452

**2000**

<b>IS/CS*</b>	<b>Antrópico</b>	<b>Nube</b>	<b>Pastos</b>	<b>Suelo desnudo</b>	<b>Bosque</b>	<b>Total</b>
<b>Antrópico</b>	442	0	0	6	0	448
<b>Nube</b>	30	173	0	0	0	203
<b>Pastos</b>	0	3	517	2	0	522
<b>Suelo Desnudo</b>	0	0	0	96	0	96
<b>Bosque</b>	30	0	2	4	1529	1565
<b>Total</b>	502	176	519	108	1529	2834

**2004**

<b>IS/CS*</b>	<b>Antrópico</b>	<b>Nube</b>	<b>Pastos</b>	<b>Suelo desnudo</b>	<b>Bosque</b>	<b>Total</b>
<b>Antrópico</b>	348	15	0	23	0	386
<b>Nube</b>	0	61	0	0	0	61
<b>Pastos</b>	3	0	332	1	1	337
<b>Suelo Desnudo</b>	0	0	0	138	0	138
<b>Bosque</b>	1	3	1	0	1409	1414
<b>Total</b>	352	79	333	162	1410	2336

**2005**

<b>IS/CS*</b>	<b>Antrópico</b>	<b>Nube</b>	<b>Pastos</b>	<b>Suelo desnudo</b>	<b>Bosque</b>	<b>Total</b>
<b>Antrópico</b>	362	0	0	22	0	384
<b>Nube</b>	5	68	0	0	0	73
<b>Pastos</b>	12	0	388	0	0	400
<b>Suelo Desnudo</b>	5	0	0	220	0	225
<b>Bosque</b>	33	1	0	15	1565	1614
<b>Total</b>	417	69	388	257	1565	2696

**2009**

<b>IS/CS*</b>	<b>Antrópico</b>	<b>Nube</b>	<b>Pastos</b>	<b>Suelo desnudo</b>	<b>Bosque</b>	<b>Total</b>
<b>Antrópico</b>	821	4	0	25	0	850
<b>Pastos</b>	9	11	383	0	31	434
<b>Suelo Desnudo</b>	0	0	0	125	0	125
<b>Bosque</b>	0	1	1	4	267	273
<b>Nube</b>	0	8	0	0	0	8
<b>Total</b>	830	24	384	154	298	1690

**2013**

<b>IS/CS*</b>	<b>Antrópico</b>	<b>Nube</b>	<b>Pastos</b>	<b>Suelo desnudo</b>	<b>Bosque</b>	<b>Total</b>
<b>Antrópico</b>	599	0	0	8	0	607
<b>Nube</b>	2	57	0	0	0	59
<b>Pastos</b>	24	6	680	4	1	715
<b>Suelo Desnudo</b>	13	22	5	85	0	125
<b>Bosque</b>	51	2	2	10	2182	2247
<b>Total</b>	689	87	687	107	2183	3753

2014							
IS/CS*	Antrópico	Nube	Pastos	Suelo desnudo	Bosque	Total	
<b>Antrópico</b>	523	0	0	0	0	0	523
<b>Nube</b>	0	22	0	0	0	0	22
<b>Pastos</b>	0	3	388	0	2	0	393
<b>Suelo Desnudo</b>	0	1	0	0	72	0	73
<b>Bosque</b>	4	4	0	0	3	1835	1846
<b>Total</b>	527	30	388	0	77	1835	2857

2016							
IS/CS*	Antrópico	Nube	Pastos	Suelo Desnudo	Bosque	Total	
<b>Antrópico</b>	735	1	0	0	1	0	737
<b>Nube</b>	9	8	0	0	0	0	17
<b>Pastos</b>	14	1	371	0	11	9	406
<b>Suelo Desnudo</b>	6	0	0	0	74	0	80
<b>Bosque</b>	0	1	0	0	4	2668	2673
<b>Total</b>	764	11	371	0	90	2677	3913

\*IS: Imágenes satelitales/ CS: Clasificación supervisada, valores en ha

Fuente: Elaboración propia

De la clasificación supervisada se obtuvieron unas regiones de interés (ROIs), consistentes en las cinco categorías de coberturas observadas en la imagen. En la Tabla 14 se indica el número de píxeles empleados para cada una de las imágenes para cada región de interés establecida.

Tabla 14

*Píxeles tomados para cada ROI*

Región de interés (ROI)	Número de píxeles							
	1997	2000	2004	2005	2009	2013	2014	2016
Antrópico	820	502	352	417	830	689	527	764
Nube	58	176	79	69	24	87	30	11
Pastos	692	519	333	388	384	687	388	371
Suelo desnudo	392	108	162	257	154	107	77	90
Bosque	2490	1529	1410	1565	2098	2183	1835	2677
<b>Total</b>	4452	2834	2336	2696	3490	3753	2857	3913

Fuente: Elaboración propia



## **6.2 Mapas de coberturas según análisis de imágenes satelitales**

A continuación, se presentan los mapas de coberturas entre los años 1997 a 2015 para las veredas Las Palmas y Pantanillo, obtenidos por clasificación supervisada, por método de Mahalanobis, a partir de imágenes Landsat. Todas se presentan en el sistema de proyección UTM 18N, debido a que las imágenes satelitales originales están en este sistema y se decidió conservarlo para poder hacer comparaciones sin distorsiones por diferentes proyecciones. Los años analizados son: 1997, 2000, 2004, 2005, 2009, 2013, 2014, y 2016. Además, se presentan las variaciones entre cada uno de los años para los que se tiene información.

Las coberturas a analizar fueron: bosques, pastos, suelos desnudos, urbano y nube. Estas categorías se seleccionaron debido a que abarcan el mayor espectro de interpretación y resaltarán los rasgos más representativos en las coberturas del área de estudio.

### **6.2.1 Mapa de cobertura año 1997.**

Como se observa en la Figura 8 el uso de suelo predominante es agrícola, expresado en el alto porcentaje de pastos existentes en ambas veredas, asociado a esta cobertura están las vías para acceder a estos pastizales. Las zonas de bosque se concentran hacia el sector occidental limitado por la vía Las Palmas y hacia los límites con el municipio de El Retiro, mayoritariamente presentes en la vereda Pantanillo con áreas más amplias en pocos polígonos con respecto a la vereda Las Palmas. La cobertura antrópica está nucleada en el sector del alto Las Palmas y aledaña a las vías principales, como habría de esperarse. La presencia de suelo desnudo esta diseminada, sin embargo se puede observar un cúmulo cerca a la cobertura antrópica ubicada en el alto de Las Palmas, lo cual podría deberse al proceso de remoción de la cobertura vegetal y al suelo para la preparación del terreno para el inicio de actividades de construcciones civiles, además de otro sector localizado en la parte central asociado a la cobertura de pastos, lo cual induce a pensar que podría ser la preparación del suelo para procesos agropecuarios transitorios tipo cultivos.

La presencia de nubes que propone el software al interpretar la imagen para este año es muy baja y en algunas secciones están asociadas con la antrópica. Esta aparición corresponde a

un error en el algoritmo de procesamiento y se da porque ambas coberturas poseen una alta reflectancia similar. Las áreas estimadas para este año se presentan en la tabla 15.

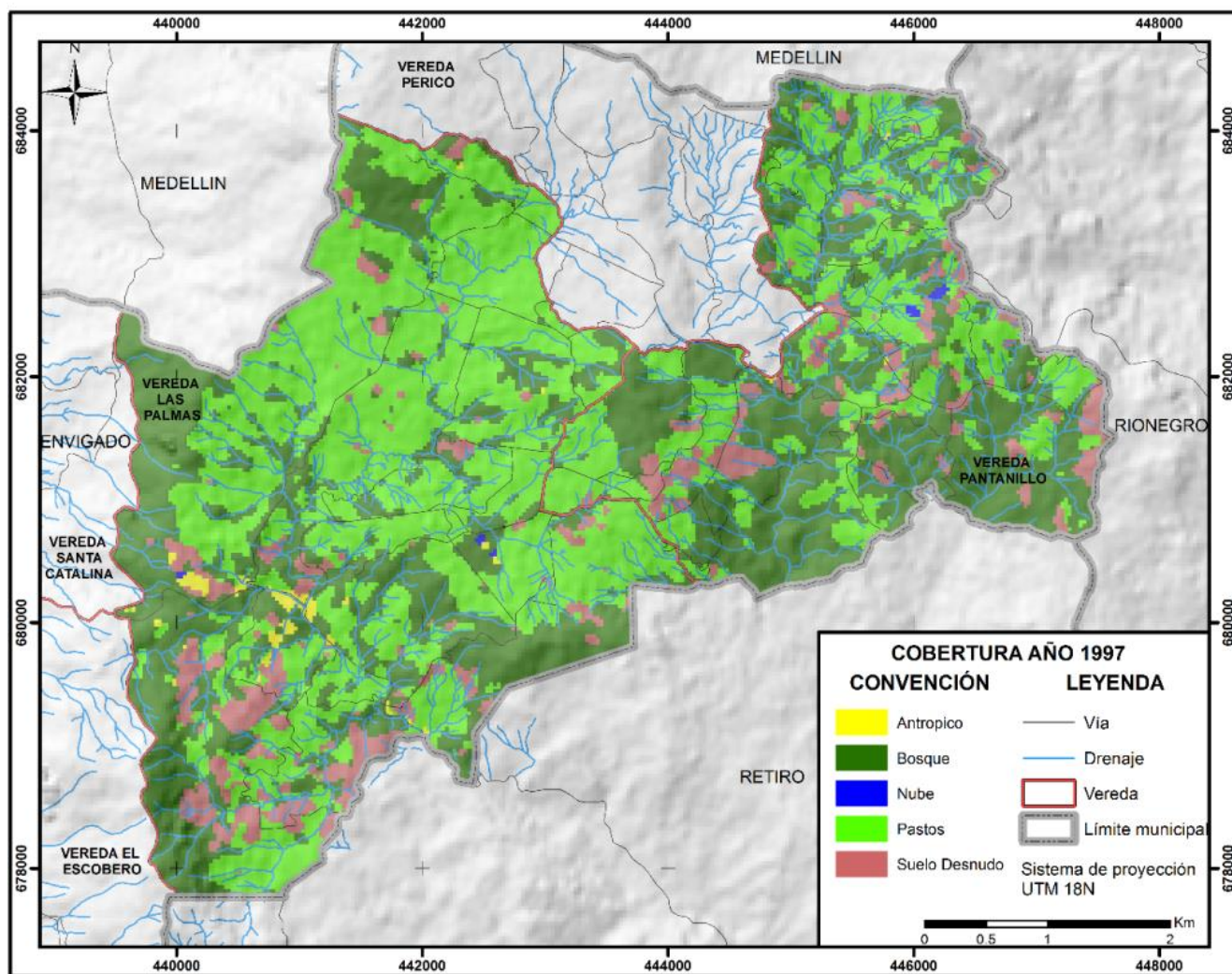


Figura 8. Mapa de coberturas año 1997. Fuente: Elaboración propia

Tabla 15

*Áreas de coberturas para imagen del año 1997*

Coberturas	Área (ha)		Total
	Vereda Las Palmas	Vereda Pantanillo	
Antrópico	16,98	1,05	18,03
Bosque	626,52	545,08	1171,60
Pastos	946,84	367,84	1314,68
Suelo desnudo	142,67	112,05	254,72
Nube	1,26	2,25	3,51
<b>Total</b>	<b>1734,27</b>	<b>1028,27</b>	<b>2762,55</b>

Fuente: Elaboración propia

### 6.2.2 Mapa de cobertura año 2000.

Como se puede observar en la Figura 9, el contraste entre la información generada en el año 1997 y el 2000 es marcado, porque para este último año el resultado obtenido presenta menos áreas de suelo desnudo y los pocos focos presentes están distribuidos aleatoriamente.

El uso de suelo predominante sigue siendo el agrícola, expresada en el alto porcentaje de pastos existentes concentrados en la zona central con una ganancia en el área. Las zonas de bosque se concentran hacia el sector occidental, estando limitado por la vía Las Palmas y hacia los límites con el municipio de El Retiro. La zona antrópica presente nucleada en el alto de Las Palmas es coherente con la imagen del año anterior analizado, con un aumento en su área. Las nubes son casi despreciables como cobertura interpretada por el programa. Las áreas estimadas para este año se presentan en la tabla 16.

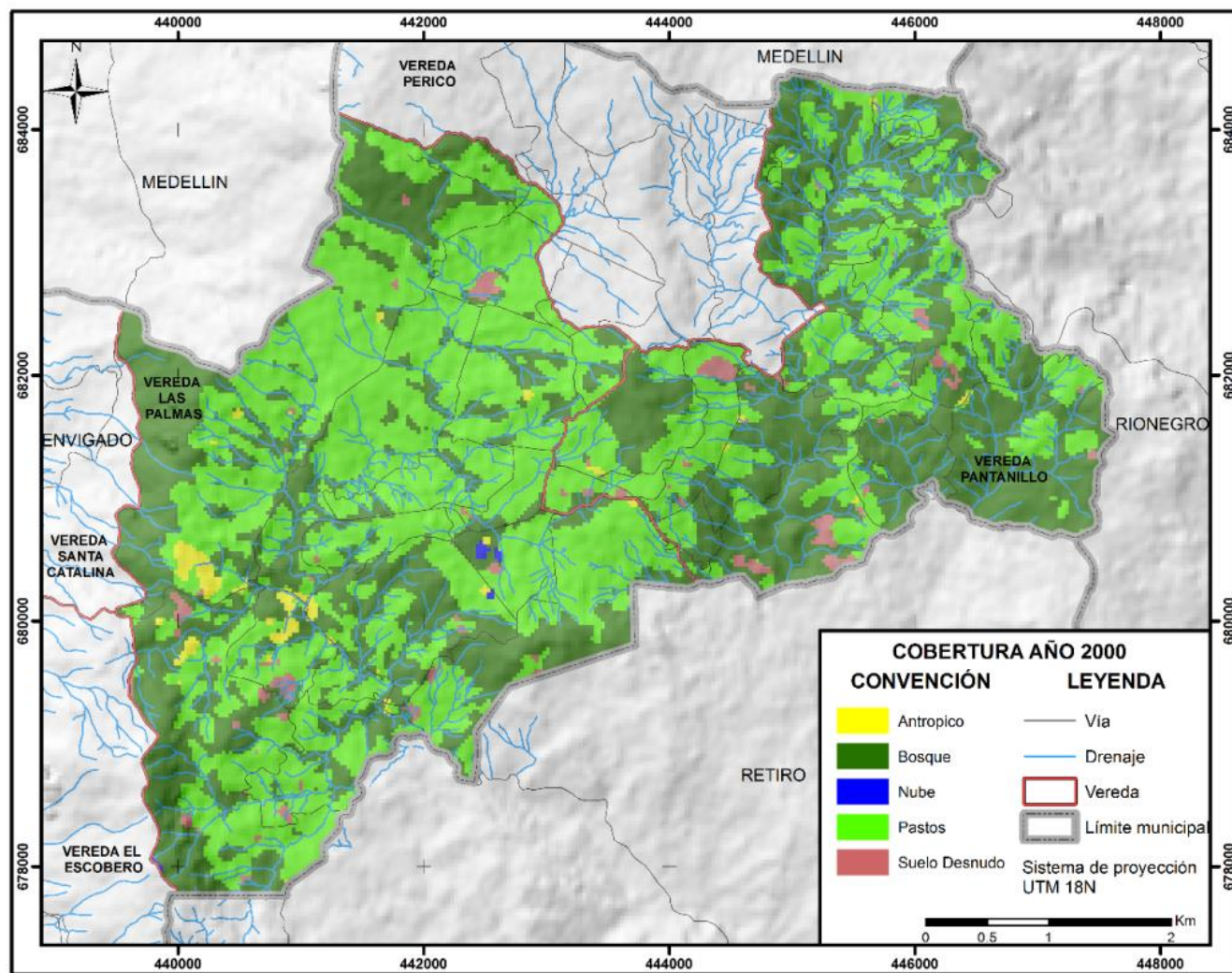


Figura 9. Mapa de coberturas año 2000. Fuente: Elaboración propia

Tabla 16

Áreas de coberturas para imagen del año 2000

Año 2000 Cobertura	Área (ha)		
	Las Palmas	Pantanillo	Total
Antrópico	25,40	2,93	28,33
Bosque	654,18	591,67	1245,85
Pastos	1028,89	409,73	1438,63
Suelo desnudo	22,96	23,94	46,90
Nube	2,84		2,84
<b>Total general</b>	<b>1734,27</b>	<b>1028,27</b>	<b>2762,55</b>

Fuente: Elaboración propia

### 6.2.3 Mapa de cobertura año 2004.

La información arrojada para este año, como se evidencia en la Figura 10, muestra que la presencia marcada de los pastos se concentra en la parte central del área de estudio. Las zonas de bosque se concentran hacia el sector occidental y en los límites con el municipio de El Retiro. La cobertura antrópica muestra su crecimiento en la zona del alto de las Palmas y en el sector conocido como Indiana. Sin embargo, se observa hacia la zona central de la imagen un polígono con forma en herradura el cual corresponde a un área con cultivos bajo invernadero, clasificada como cobertura antrópica.

Se observa sobredimensionamiento en la capa de suelos desnudos con una distribución similar a la observada en el año 1997, pero con un área efectiva menor y una prevalencia de polígonos de menor tamaño en la zona sur occidental entre los límites de las veredas Las Palmas y El Escobero. Las nubes como última cobertura interpretada poseen un área despreciable. Las áreas estimadas para este año se presentan en la tabla 17.

Tabla 17

*Áreas de coberturas para imagen del año 2004*

Año 2004	Área (ha)		
	Cobertura	Las Palmas	Pantanillo
Antrópico	57,44	17,65	75,09
Bosque	708,29	589,28	1297,58
Nube	0,27		0,27
Pastos	881,34	325,06	1206,39
Suelo desnudo	86,93	96,28	183,22
Total general	1734,27	1028,27	2762,55

Fuente: Elaboración propia



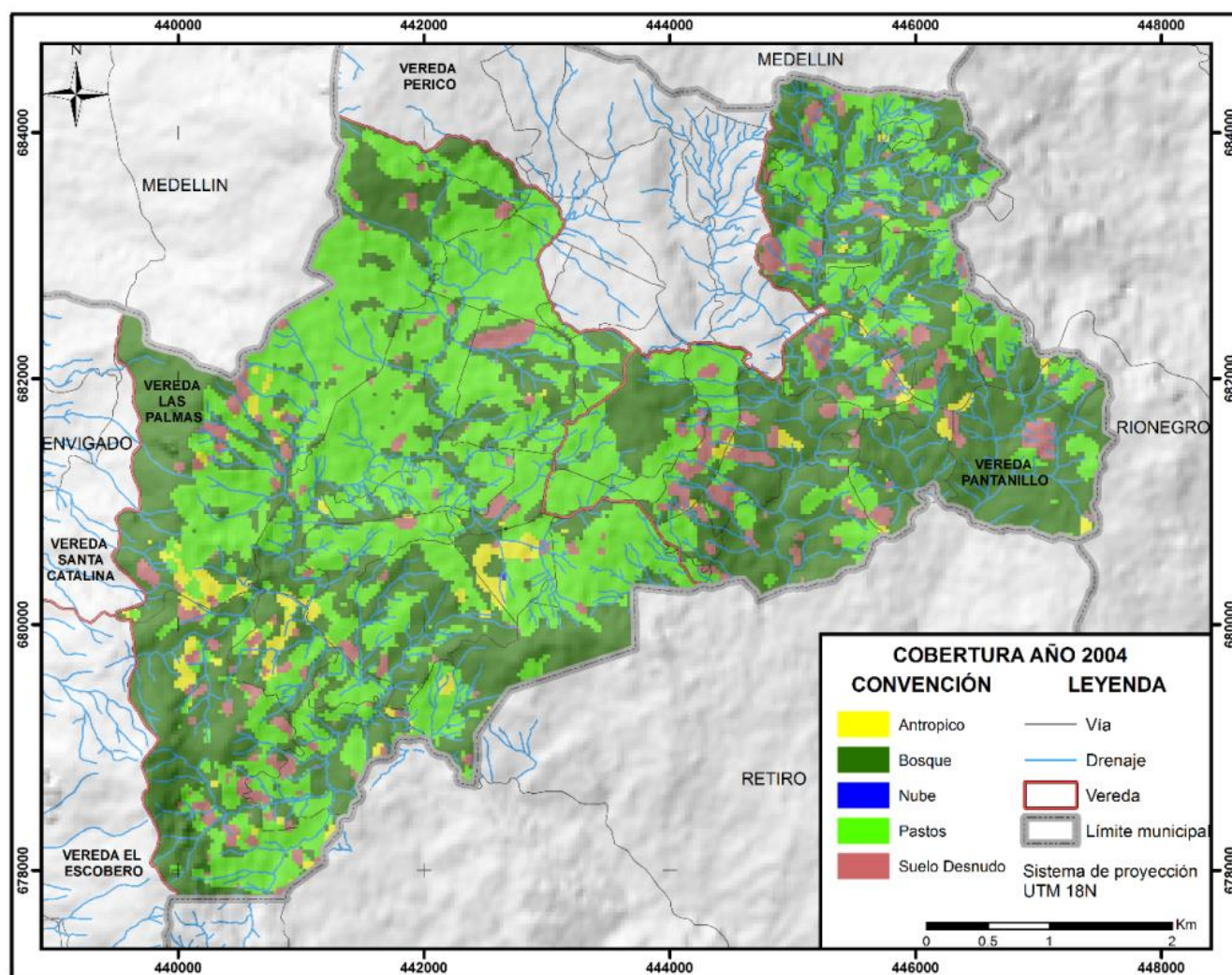


Figura 10. Mapa de coberturas año 2004. Fuente: Elaboración propia

#### 6.2.4 Mapa de cobertura año 2005.

Las distribuciones de las diferentes coberturas para el año 2005, mostradas en la Figura 11, son similares a la del año anterior, presentándose cambios en las áreas. En este año se observa la consolidación del sector Alto de palmas – Indiana como una zona de desarrollo urbano importante y las áreas urbanas son menores comparadas con el año anterior, para ambas veredas. Con respecto al año anterior, hay una leve disminución en el área de pastos, un aumento en el bosque en ambas veredas y el área de suelo desnudo aumenta. Las áreas estimadas para este año se presentan en la tabla 18.

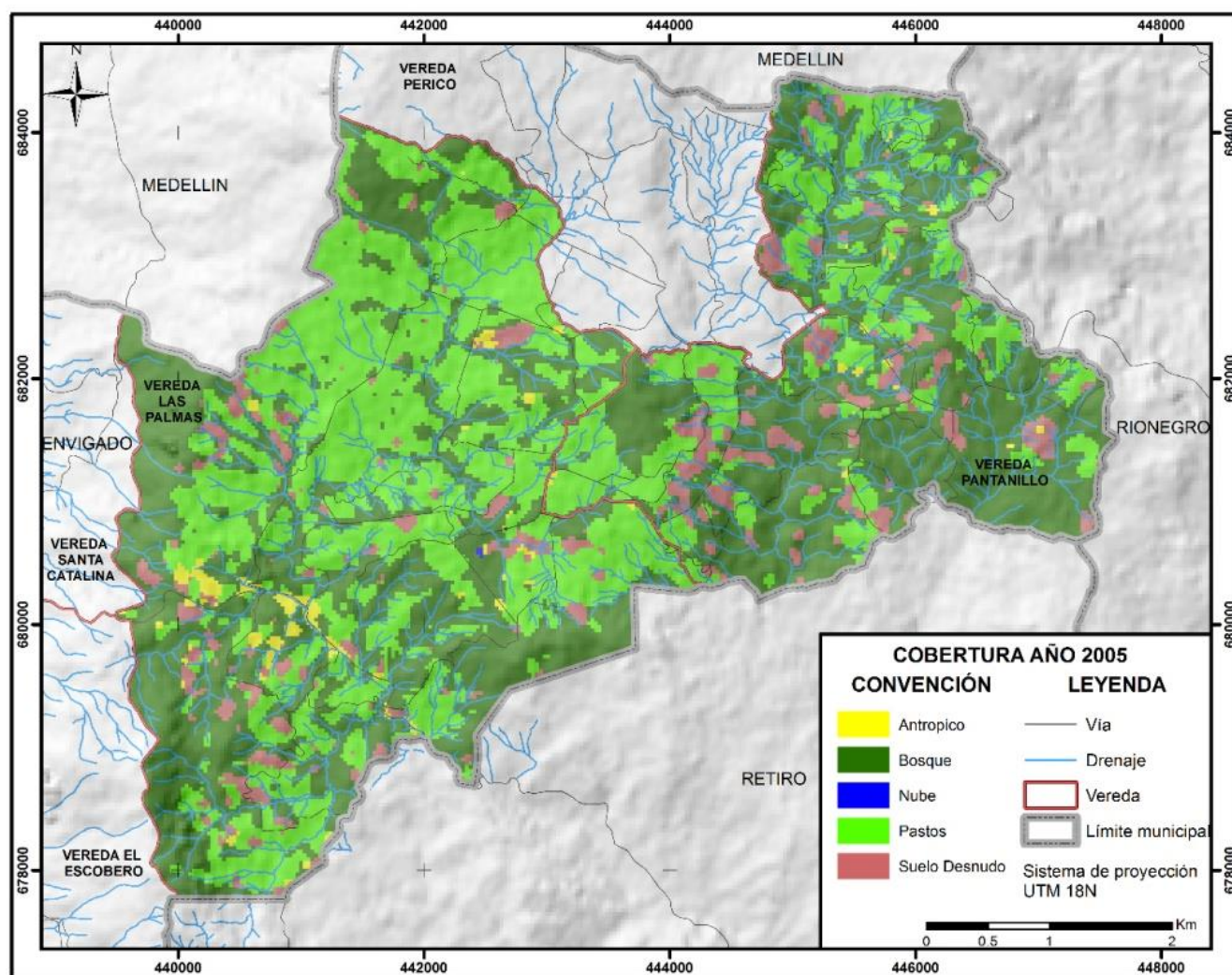


Figura 11. Mapa de coberturas año 2005. Fuente: Elaboración propia

Tabla 18

*Áreas de coberturas para imagen del año 2005*

Año 2005	Área (ha)		
	Las Palmas	Pantanillo	Total
Antrópico	34,12	6,05	40,17
Bosque	760,64	615,07	1375,71
Nube	0,45		0,45
Pastos	843,50	299,39	1142,89
Suelo desnudo	95,56	107,76	203,32
<b>Total general</b>	<b>1734,27</b>	<b>1028,27</b>	<b>2762,55</b>

Fuente: Elaboración propia

### 6.2.5 Mapa de cobertura año 2009.

En la información para el año 2009, contenida en la Figura 12, se observa una pronunciada disminución del área de suelo desnudo dejando pequeños polígonos en el sector central del área de estudio. El crecimiento del área antrópica del sector Alto de Las Palmas – Indiana es muy considerable.

La presencia de los bosques ha disminuido y se presentan más polígonos como relictos de bosques, fenómeno que se aprecia bien en el sector norte de la vereda Pantanillo. Se observa un aumento en el área de pastos con respecto al año anterior analizado. Las áreas estimadas para este año se presentan en la tabla 19.

Tabla 19

*Áreas de coberturas para imagen del año 2009*

Año 2009 Cobertura	Área (ha)		
	Las Palmas	Pantanillo	Total
Antrópico	71,09	10,26	81,36
Bosque	682,45	556,79	1239,24
Nube		0,11	0,11
Pastos	972,35	450,42	1422,78
Suelo desnudo	8,38	10,69	19,06
<b>Total general</b>	<b>1734,27</b>	<b>1028,27</b>	<b>2762,55</b>

Fuente: Elaboración propia



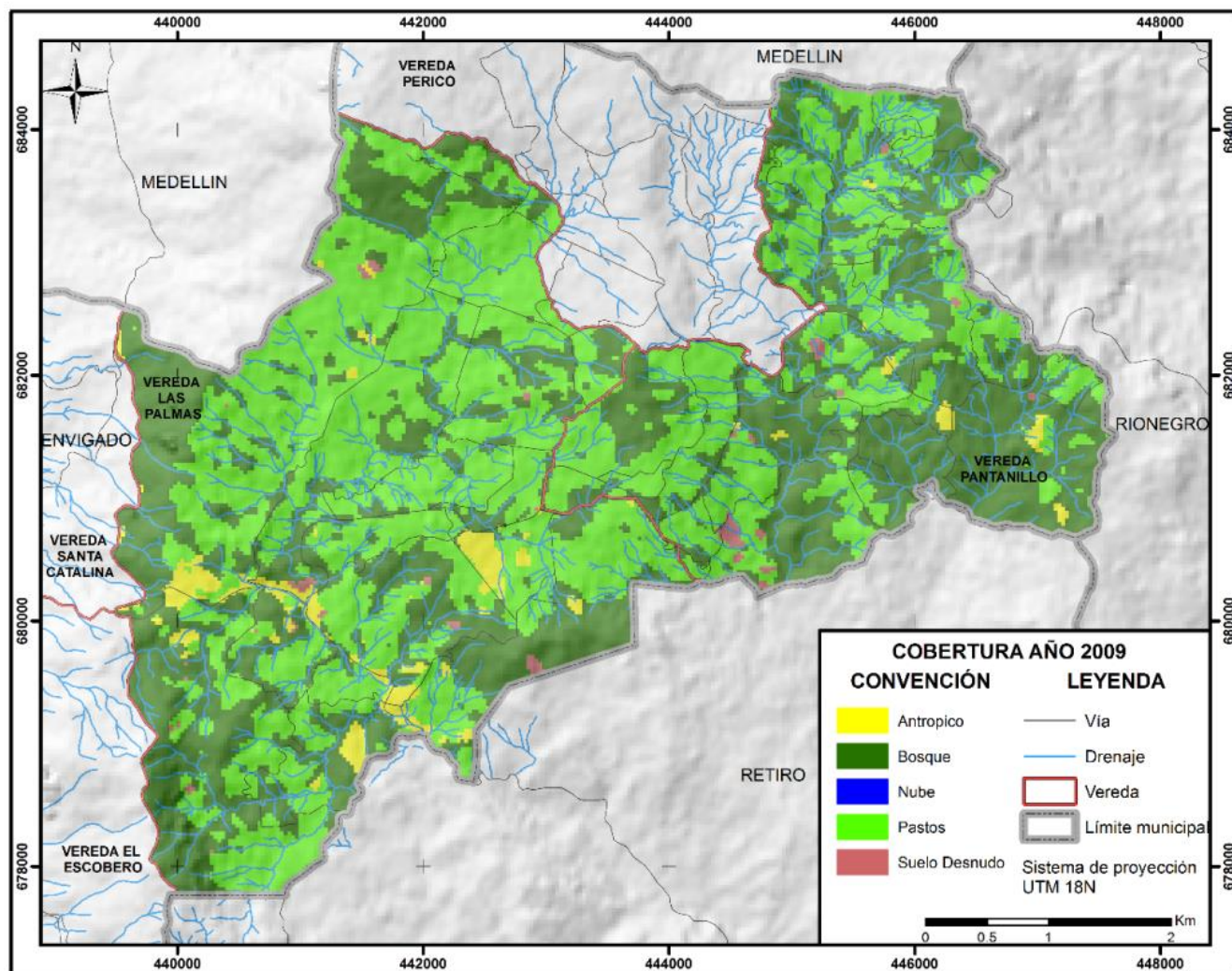


Figura 12. Mapa de coberturas año 2009. Fuente: Elaboración propia

### 6.2.6 Mapa de cobertura año 2013.

La información presente para el año 2013, como se contempla en la Figura 13, presenta un crecimiento del área de suelo desnudo mostrando pequeños polígonos de forma elongada distribuidos aleatoriamente. El área antrópica del sector Alto de palmas – Indiana continúa definida.

La presencia de los bosques ha disminuido y se acentúan más los pequeños polígonos correspondientes a relictos de bosques, evidentes en el sector el sector occidental del área. Se

clasificó erróneamente como nubes elementos que corresponden a cobertura antrópica. Algunos elementos antrópicos fueron clasificados como suelos y pastos. Las áreas estimadas para este año se presentan en la tabla 20.

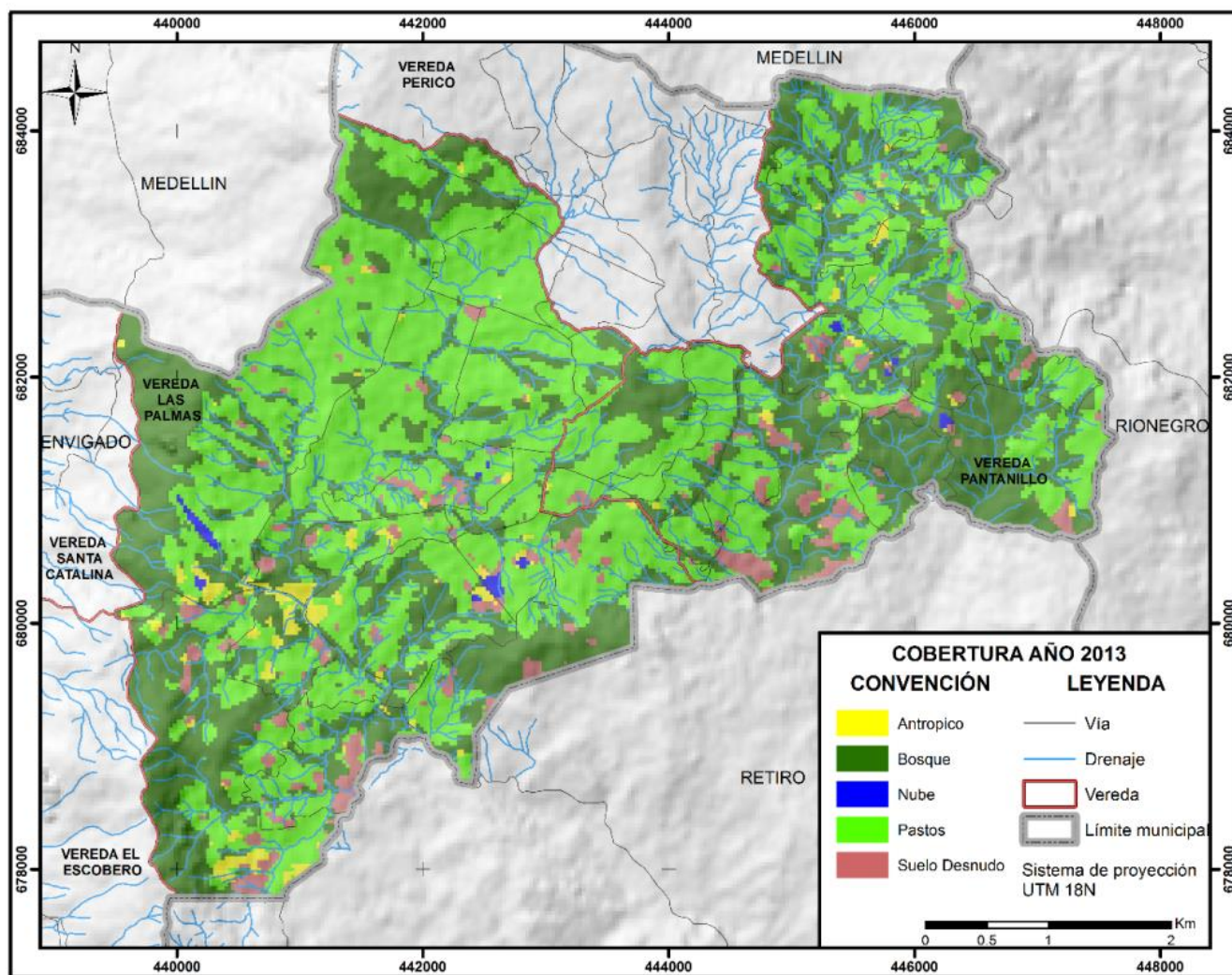


Figura 13. Mapa de coberturas año 2013. Fuente: Elaboración propia

Tabla 20

*Áreas de coberturas para imagen del año 2013*

<b>Año 2013</b>	<b>Área (ha)</b>		
	<b>Cobertura</b>	<b>Las Palmas</b>	<b>Pantanillo</b>
Antrópico	47,86	9,38	57,24
Bosque	639,01	498,53	1137,54
Nube	8,19	2,43	10,62
Pastos	963,68	461,99	1425,67
Suelo desnudo	75,53	55,95	131,48
<b>Total general</b>	<b>1734,27</b>	<b>1028,27</b>	<b>2762,55</b>

Fuente: Elaboración propia

**6.2.7 Mapa de cobertura año 2014.**

La información presente para el año 2014 (Figura 14) es muy similar a la forma de los polígonos de las diferentes coberturas, sin embargo, las áreas presentan un cambio claro. Para esta clasificación se observa, con respecto al año anterior analizado, una disminución en las áreas de pasto con un aumento en el área de bosque y una menor presencia de suelo desnudo. Hay algunas áreas antrópicas clasificadas como pasto, lo cual es evidente en el sector noroccidental de la vereda Las Palmas y al norte de la vereda Pantanillo. Las áreas estimadas para este año se presentan en la Tabla 21.

Tabla 21

*Áreas de coberturas para imagen del año 2014*

<b>Año 2014</b>	<b>Área (ha)</b>		
	<b>Cobertura</b>	<b>Las Palmas</b>	<b>Pantanillo</b>
Antrópico	35,90	2,70	38,60
Bosque	759,60	628,33	1387,93
Nube	1,17	0,81	1,98
Pastos	914,73	389,58	1304,32
Suelo desnudo	22,86	6,85	29,71
<b>Total general</b>	<b>1734,27</b>	<b>1028,27</b>	<b>2762,55</b>

Fuente: Elaboración propia



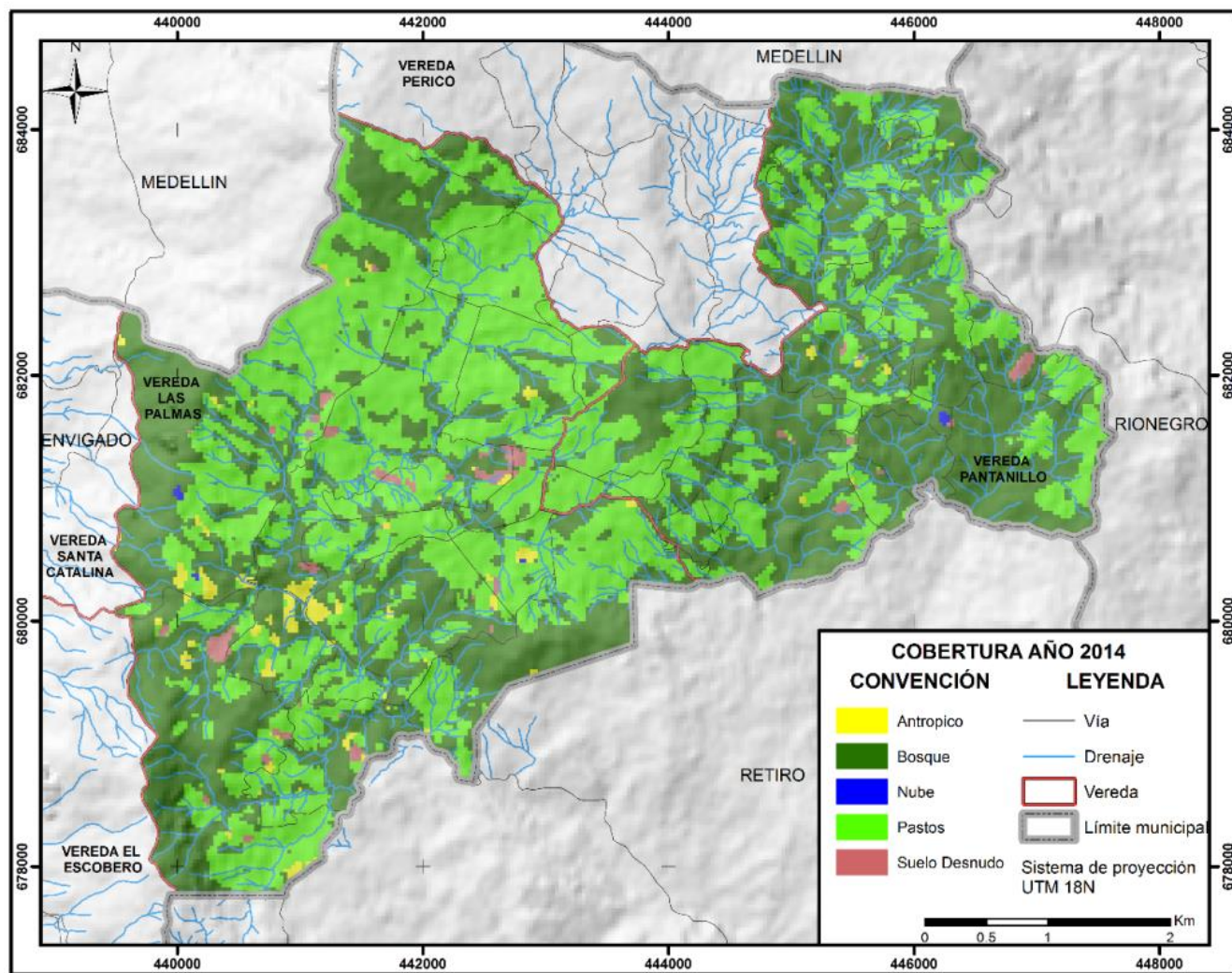


Figura 14. Mapa de coberturas año 2014. Fuente: Elaboración propia

### 6.2.8 Mapa de cobertura año 2016.

Como se puede observar en la Figura 15, en este año el uso de suelo predominante final es agrícola expresado en el alto porcentaje de pastos existentes concentrados mayormente en la zona central, afirmado durante el transcurso del tiempo analizado y fuertemente influenciada por las vías para poder acceder a estos pastizales. Las zonas de bosque se concentran hacia el sector occidental estando limitado por la vía Las Palmas, unos relictos importantes de bosques de galería en el centro de la vereda Las Palmas y hacia los límites con el municipio del Retiro y

localmente con el municipio de Medellín. La cobertura antrópica se encuentra fuertemente nucleada en el sector del alto Las Palmas, cerca de la Universidad EIA con un fuerte desarrollo urbanístico y aledaño a las vías principales, siendo esto una consecuencia natural de este tipo de coberturas por el fácil acceso al sector. Las áreas estimadas para este año se presentan en la tabla 22.

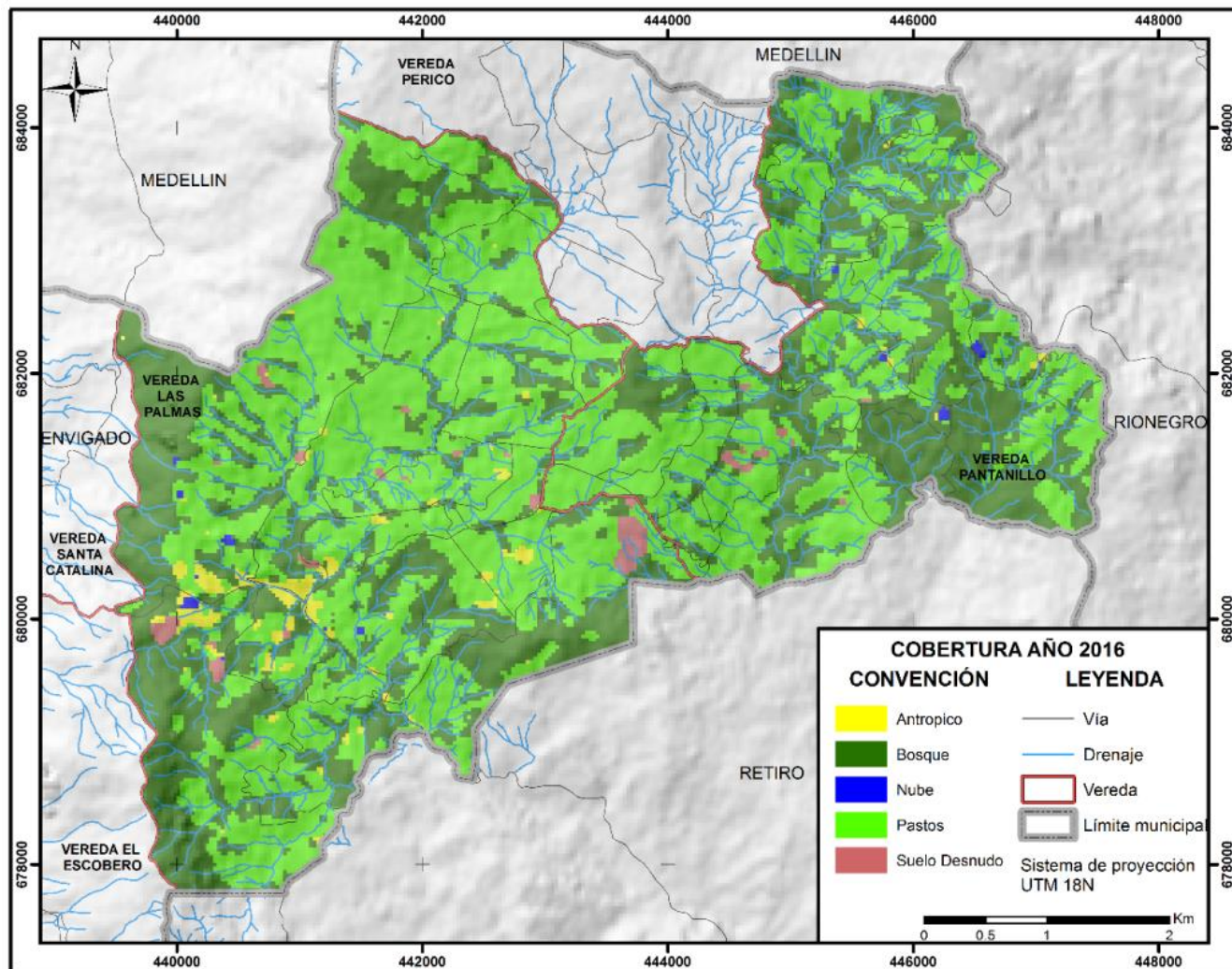


Figura 15. Mapa de coberturas año 2015. Fuente: Elaboración propia

Tabla 22

*Áreas de coberturas para imagen del año 2016*

<b>Año 2016</b>	<b>Área (ha)</b>			
	<b>Cobertura</b>	<b>Las Palmas</b>	<b>Pantanillo</b>	<b>Total</b>
Antrópico	42,62	2,84	45,46	
Bosque	650,46	469,46	1119,92	
Nube	3,24	2,79	6,03	
Pastos	1014,32	547,83	1562,15	
Suelo desnudo	23,63	5,36	28,99	
<b>Total general</b>	<b>1734,27</b>	<b>1028,27</b>	<b>2762,55</b>	

Fuente: Elaboración propia

La presencia de suelo desnudo es local y se la encuentra contiguo a la cobertura antrópica en el sector del Alto de Palmas – Indiana, afirmando la idea que se debe al proceso de remoción de la cobertura vegetal y del suelo para la preparación del terreno para el inicio de actividades de construcciones civiles (muy marcado en la zona del alto de Las Palmas y en áreas colindantes con el *Mall* de Indiana) y también asociado a la cobertura de pastos, lo cual induce interpretar que se debe a la preparación del suelo para procesos agropecuarios. Algunos elementos antrópicos no fueron clasificados adecuadamente, como ocurre en el sector noroccidental de la vereda las Palmas y el norte de la vereda Pantanillo, en donde se clasificaron como pastos y bosques. De la misma manera, la clasificación de algunas nubes constituye un error en el algoritmo pues realmente el objeto a clasificar pertenece a cobertura antrópica (dado que ambas capas poseen una alta reflectancia), marcando más la interpretación de la expansión antrópica en los sectores de Las Palmas (alto y *Mall* de Indiana).

En la Tabla 23 se sintetiza el área total, dada en ha, y el porcentaje de cada cobertura para cada año analizado. En la Figura 16 se muestran estos resultados de manera gráfica.

Tabla 23

Área de cada cobertura para cada año analizado con imágenes Landsat

Cobertura	1997		2000		2004		2005		2009		2013		2014		2016	
	Área	%	Área	%	Área	%	Área	%	Área	%	Área	%	Área	%	Área	%
<b>Antrópico</b>	18,03	0,7	28,33	1,0	75,09	2,7	40,17	1,5	81,36	2,9	57,24	2,1	38,60	1,4	45,46	1,6
<b>Bosque</b>	1171,60	42,4	1245,85	45,1	1297,58	47,0	1375,71	49,8	1239,24	44,9	1137,54	41,2	1387,93	50,2	1119,92	40,5
<b>Nube</b>	3,51	0,1	2,84	0,1	0,27	0,0	0,45	0,0	0,11	0,0	10,62	0,4	1,98	0,1	6,03	0,2
<b>Pastos</b>	1314,68	47,6	1438,63	52,1	1206,39	43,7	1142,89	41,4	1422,78	51,5	1425,67	51,6	1304,32	47,2	1562,15	56,5
<b>Suelo desnudo</b>	254,72	9,2	46,90	1,7	183,22	6,6	203,32	7,4	19,06	0,7	131,48	4,8	29,71	1,1	28,99	1,0
<b>Total</b>	2762,55	100	2762,55	100	2762,55	100	2762,55	100	2762,55	100	2762,55	100	2762,55	100	2762,55	100

\*Área en ha

Fuente: Elaboración propia

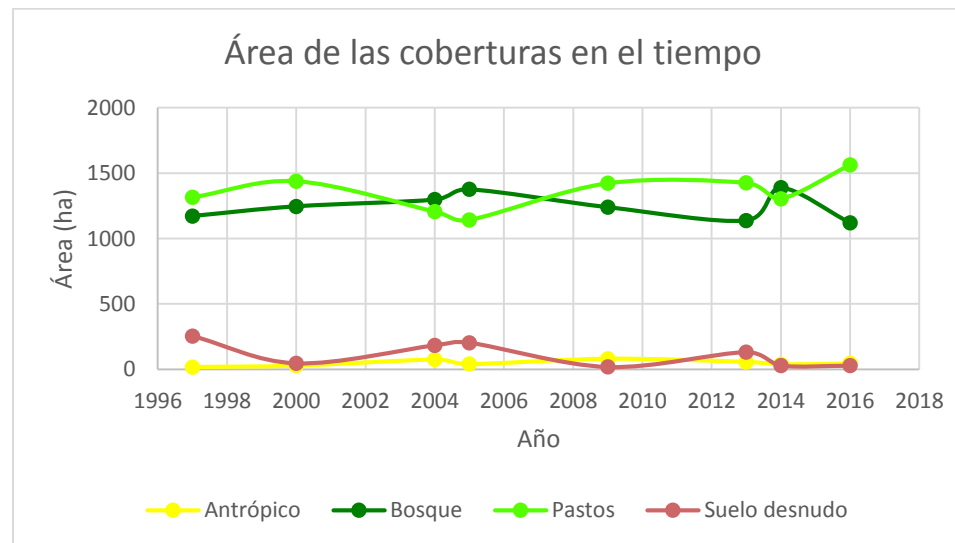


Figura 16. Variación del área total de las coberturas analizadas con imágenes Landsat. Fuente: Elaboración propia

Mediante la Tabla 23 y la Figura 16 se pueden comparar los cambios de áreas para las coberturas y la relación que entre ellas puede existir. Sin embargo, para el caso analizado no es posible establecer una conclusión significativa pues el comportamiento para las diferentes coberturas analizadas presenta fluctuaciones irregulares no coherentes con la tendencia esperada como decreciente, continua, o creciente para cambios multitemporales. Se puede observar que la cobertura antrópica, a pesar de los picos negativos en el 2005 y en el 2013, presenta una tendencia a ser creciente, de la misma manera la curva para el bosque presenta una tendencia decreciente en área que traía desde el año 2005, salvo por un pico positivo en el 2014 que rompe con dicho sentido. Al comparar la gráfica para pastos y bosques, se observa que hay una relación entre ambas en la cual una aumenta mientras la otra disminuye o viceversa. También se resalta que la curva de suelo desnudo guarda cierta simetría con la curva de pastos. Se pudo observar que la cobertura de suelo desnudo en ocasiones fue clasificada por el programa como cobertura antrópica o la cobertura pastos.

### **6.3 Cambio de coberturas según análisis de imágenes satelitales**

Se realizó un análisis dinámico de coberturas para los diferentes intervalos de tiempo analizados: 1997-2000, 2000-2004, 2004-2005, 2005-2009, 2009-2013, 2013-2014, 2014-2016, 1997-2016.

En la Tabla 24, la Tabla 25 y la Tabla 26 se presentan las áreas de estos cambios dadas en hectáreas y sus porcentajes para las veredas Las Palmas, Pantanillo, además de la totalidad de las dos veredas. Como puede observarse en las tablas, también se incluyen las áreas de coberturas que no cambiaron y que se conservan como la misma cobertura. Estos resultados pueden visualizarse en las correspondientes gráficas de barras (Figura 17, Figura 18 y Figura 19), en las que no se tuvo en cuenta las áreas que no cambiaron ni los resultados asociados a nubes.



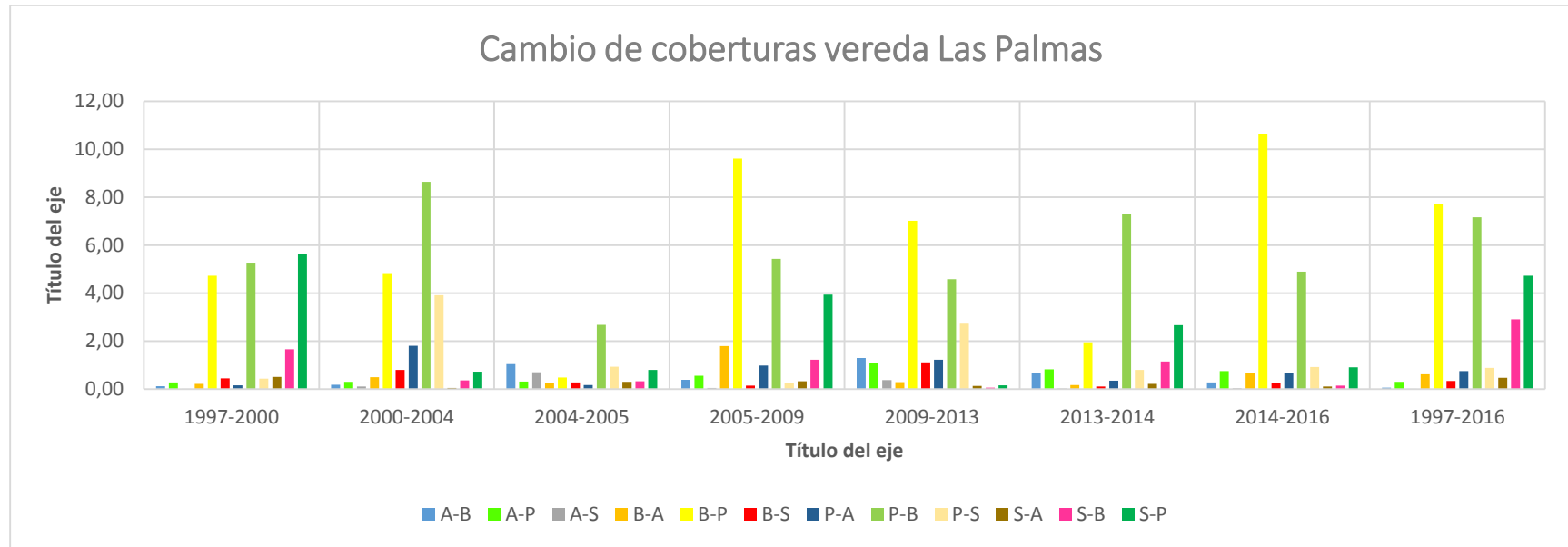
Tabla 24

*Áreas del cambio de coberturas en diferentes intervalos temporales para vereda Las Palmas*

Tipo de cambio	1997-2000		2000-2004		2004-2005		2005-2009		2009-2013		2013-2014		2014-2016		1997-2016	
	ha	%	ha	%	ha	%	ha	%	ha	%	ha	%	ha	%	ha	%
<b>A-B</b>	2,06	0,12	3,06	0,18	18,02	1,04	6,62	0,38	22,35	1,29	11,38	0,66	4,82	0,28	0,95	0,05
<b>A-P</b>	4,84	0,28	5,15	0,30	5,48	0,32	9,62	0,55	19,01	1,10	14,31	0,83	12,95	0,75	5,22	0,30
<b>A-S</b>	0,09	0,01	1,89	0,11	12,17	0,70	0,72	0,04	6,48	0,37	0,36	0,02	0,54	0,03	0,09	0,01
<b>A-N</b>	0,27	0,02	0,00	0,00	0,45	0,03	0,00	0,00	3,60	0,21	0,00	0,00	0,09	0,01	0,09	0,01
<b>B-A</b>	3,69	0,21	8,55	0,49	4,50	0,26	31,09	1,79	4,86	0,28	2,89	0,17	11,71	0,67	10,62	0,61
<b>B-P</b>	82,02	4,73	83,82	4,83	8,33	0,48	166,75	9,61	121,70	7,02	33,82	1,95	184,36	10,63	133,64	7,71
<b>B-S</b>	7,66	0,44	13,77	0,79	4,75	0,27	2,35	0,14	19,35	1,12	1,71	0,10	4,32	0,25	5,85	0,34
<b>B-N</b>	1,63	0,09	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,09	0,01	0,00	0,00	0,90	0,05	1,62	0,09
<b>P-A</b>	2,63	0,15	31,16	1,80	2,91	0,17	16,84	0,97	21,10	1,22	6,08	0,35	11,43	0,66	12,90	0,74
<b>P-B</b>	91,45	5,27	149,84	8,64	46,33	2,67	94,22	5,43	79,33	4,57	126,28	7,28	84,81	4,89	124,15	7,16
<b>P-S</b>	7,52	0,43	67,86	3,91	16,14	0,93	4,63	0,27	47,16	2,72	13,77	0,79	15,89	0,92	15,35	0,88
<b>P-N</b>	0,63	0,04	0,18	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	4,50	0,26	0,54	0,03	1,71	0,10	1,44	0,08
<b>S-A</b>	8,82	0,51	0,72	0,04	5,22	0,30	5,55	0,32	2,25	0,13	3,60	0,21	1,71	0,10	8,03	0,46
<b>S-B</b>	28,70	1,66	6,22	0,36	5,48	0,32	21,16	1,22	0,90	0,05	19,90	1,15	2,52	0,15	50,39	2,91
<b>S-P</b>	97,43	5,62	12,52	0,72	13,73	0,79	68,18	3,93	2,70	0,16	46,08	2,66	15,66	0,90	81,82	4,72
<b>S-N</b>	0,04	0,00	0,09	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,09	0,01	0,09	0,01
<b>N-A</b>	0,54	0,03	1,71	0,10	0,18	0,01	0,45	0,03	0,00	0,00	1,53	0,09	0,27	0,02	0,45	0,03
<b>N-B</b>	0,45	0,03	1,13	0,07	0,09	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	1,44	0,08	0,00	0,00	0,18	0,01
<b>N-P</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	3,51	0,20	0,45	0,03	0,63	0,04
<b>N-S</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,08	0,06	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>NO CAMBIO</b>	1393,81	80,37	1346,59	77,65	1590,49	91,71	1306,11	75,31	1378,89	79,51	1445,98	83,38	1380,05	79,57	1280,75	73,85
<b>TOTAL</b>	1734	100	1734	100	1734	100	1734	100	1734	100	1734	100	1734	100	1734	100

A: Antrópico, B: Bosque, P: Pasto, N: Nube, S= Suelo desnudo

Fuente: Elaboración propia



A: Antrópico, B: Bosque, P: Pasto, S= Suelo desnudo

Figura 17. Cambio de coberturas en vereda Las Palmas. Fuente: Elaboración propia

Para todos los intervalos temporales el cambio más significativo en coberturas es de bosque a pasto (con valores entre 0,48% y 10,63%), lo cual induce a pensar en un aumento de la actividad agropecuaria para la vereda. Seguido de este se tiene el cambio de pasto a bosque (con valores entre 2,67% y 8,54%), el cual es poco probable ya que no se han hecho actividades de reforestación en el área, cuyo resultado pueda deberse a malas clasificaciones del programa. También se resalta el cambio de suelo a pastos (con valores entre 0,16% y 5,62%). Los cambios de cobertura hacia cobertura antrópica tienen bajos porcentajes (menores a 1,8%, con un valor promedio de 0,5%). Los porcentajes de áreas que no cambiaron son significativos y oscilan entre 73,85% y 80,37%.

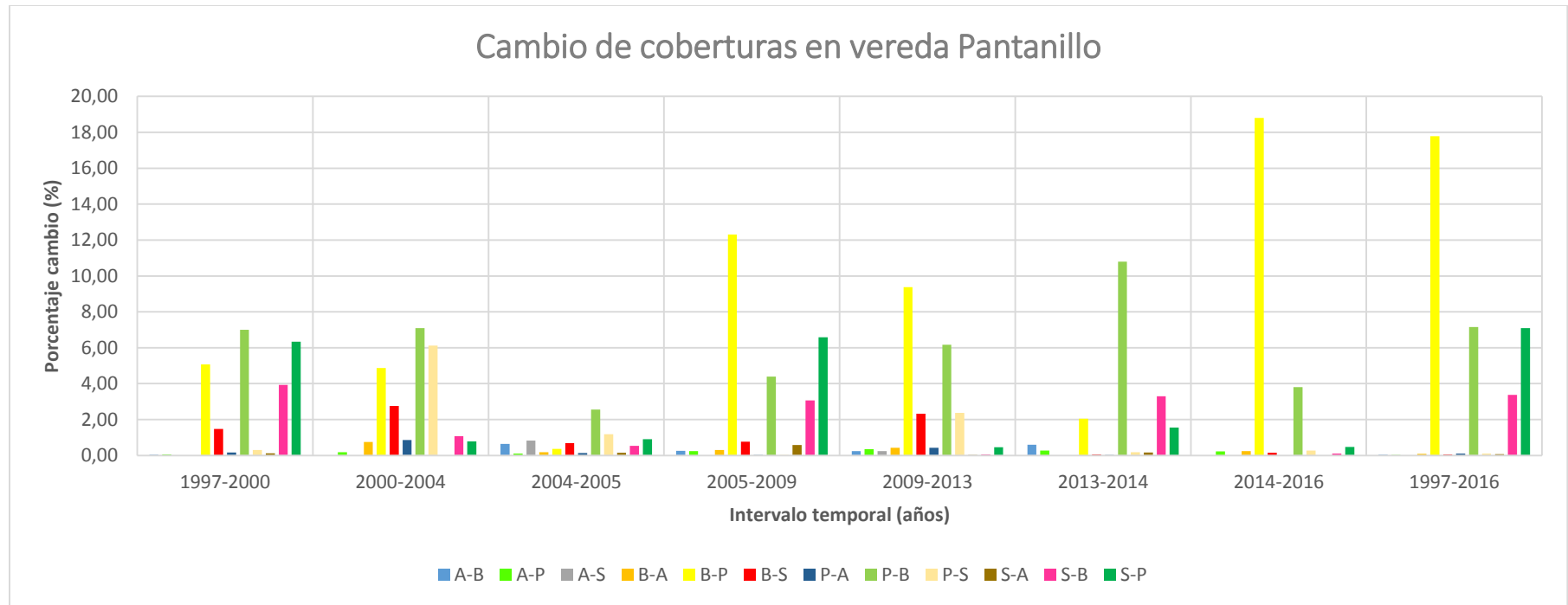
Tabla 25

Áreas del cambio de coberturas en diferentes intervalos temporales para vereda Pantanillo

Tipo de cambio	1997-2000		2000-2004		2004-2005		2005-2009		2009-2013		2013-2014		2014-2016		1997-2016	
	ha	%	ha	%	ha	%	ha	%	ha	%	ha	%	ha	%	ha	%
A-B	0,42	0,04	0,00	0,00	6,69	0,65	2,72	0,26	2,52	0,25	6,16	0,60	0,18	0,02	0,42	0,04
A-N	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,44	0,14	0,00	0,00	0,00	0,00	0,18	0,02
A-P	0,55	0,05	1,85	0,18	1,08	0,11	2,44	0,24	3,60	0,35	2,86	0,28	2,34	0,23	0,27	0,03
A-S	0,09	0,01	0,18	0,02	8,58	0,83	0,00	0,00	2,43	0,24	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
B-A	0,00	0,00	7,77	0,76	1,80	0,18	3,15	0,31	4,42	0,43	0,09	0,01	2,52	0,25	0,90	0,09
B-N	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,11	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	1,80	0,18	1,17	0,11
B-P	52,08	5,06	50,13	4,87	3,82	0,37	126,53	12,31	96,47	9,38	20,99	2,04	193,36	18,80	182,86	17,78
B-S	15,12	1,47	28,43	2,76	7,11	0,69	7,83	0,76	23,94	2,33	0,63	0,06	1,62	0,16	0,61	0,06
P-A	1,76	0,17	8,81	0,86	1,41	0,14	0,27	0,03	4,41	0,43	0,27	0,03	0,14	0,01	1,04	0,10
P-B	71,95	7,00	72,86	7,09	26,33	2,56	45,16	4,39	63,40	6,17	110,96	10,79	39,16	3,81	73,61	7,16
P-N	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,99	0,10	0,00	0,00	0,27	0,03	1,44	0,14
P-S	3,06	0,30	62,99	6,13	12,21	1,19	0,21	0,02	24,44	2,38	1,80	0,18	2,84	0,28	1,04	0,10
S-A	1,17	0,11	0,18	0,02	1,54	0,15	5,94	0,58	0,27	0,03	1,71	0,17	0,00	0,00	0,72	0,07
S-B	40,34	3,92	11,07	1,08	5,50	0,53	31,48	3,06	0,54	0,05	33,95	3,30	1,08	0,11	34,63	3,37
S-N	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
S-P	65,23	6,34	8,01	0,78	9,39	0,91	67,70	6,58	4,74	0,46	15,97	1,55	4,87	0,47	73,00	7,10
N-A	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,27	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00
N-B	1,08	0,11	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,11	0,01	0,45	0,04	0,00	0,00	1,26	0,12
N-P	0,81	0,08	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,81	0,08	0,09	0,01	0,99	0,10
N-S	0,36	0,04	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,09	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00
NO CAMBIO	774,26	75,30	776,01	75,47	942,82	91,69	734,74	71,45	794,55	77,27	831,26	80,84	778,00	75,66	654,13	63,61
<b>TOTAL</b>	1028,27	100	1028,27	100	1028,27	100	1028,27	100	1028,27	100	1028,27	100	1028,27	100	1028,27	100

A: Antrópico, B: Bosque, P: Pasto, N: Nube, S= Suelo desnudo

Fuente: Elaboración propia



A: Antrópico, B: Bosque, P: Pasto, S= Suelo desnudo

*Figura 18.* Cambio de coberturas en vereda Pantanillo. Fuente: Elaboración propia

El cambio más significativo es el de cobertura bosque a pasto (con valores entre 0,37% y 18,80%), seguido de pasto a bosque (con valores entre 2,56% y 10,79%), y luego de suelo a pasto (con valores entre 0,46% y 6,58%). A diferencia de la vereda Las Palmas, en esta vereda se resalta el cambio de bosque a suelo (con valores entre 0,06% y 2,76%). Los porcentajes de áreas que no cambiaron están entre 71,45% y 91,69%. Los cambios a coberturas antrópica tienen valores menores a 0,76%, con un promedio de 0,22%.

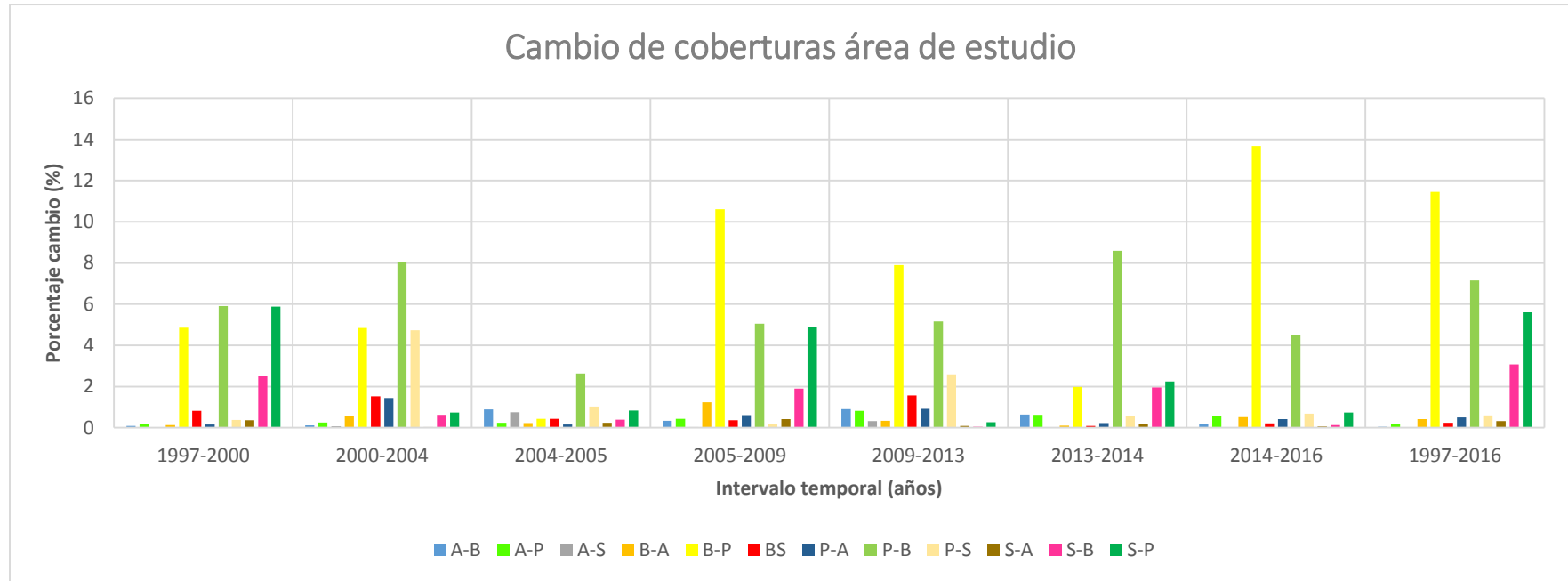
Tabla 26

*Áreas del cambio de coberturas en diferentes intervalos temporales para toda el área*

Tipo de cambio	1997-2000		2000-2004		2004-2005		2005-2009		2009-2013		2013-2014		2014-2016		1997-2016	
	ha	%	ha	%	ha	%	ha	%	ha	%	ha	%	ha	%	ha	%
<b>A-B</b>	2,48	0,09	3,06	0,11	24,71	0,89	9,33	0,34	24,87	0,90	17,54	0,63	5,00	0,18	1,38	0,05
<b>A-N</b>	0,27	0,01	0,00	0,00	0,45	0,02	0,00	0,00	5,04	0,18	0,00	0,00	0,09	0,00	0,27	0,01
<b>A-P</b>	5,38	0,19	7,00	0,25	6,56	0,24	12,06	0,44	22,61	0,82	17,17	0,62	15,29	0,55	5,49	0,20
<b>A-S</b>	0,18	0,01	2,07	0,07	20,75	0,75	0,72	0,03	8,91	0,32	0,36	0,01	0,54	0,02	0,09	0,00
<b>B-A</b>	3,69	0,13	16,31	0,59	6,30	0,23	34,25	1,24	9,29	0,34	2,98	0,11	14,23	0,51	11,52	0,42
<b>B-N</b>	1,63	0,06	0,00	0,00	0,00	0,00	0,11	0,00	0,09	0,00	0,00	0,00	2,70	0,10	2,79	0,10
<b>B-P</b>	134,10	4,85	133,95	4,85	12,15	0,44	293,28	10,62	218,17	7,90	54,82	1,98	377,72	13,67	316,51	11,46
<b>B-S</b>	22,78	0,82	42,20	1,53	11,86	0,43	10,18	0,37	43,30	1,57	2,34	0,08	5,94	0,21	6,46	0,23
<b>N-A</b>	0,54	0,02	1,71	0,06	0,18	0,01	0,45	0,02	0,00	0,00	1,80	0,07	0,27	0,01	0,45	0,02
<b>N-B</b>	1,53	0,06	1,13	0,04	0,09	0,00	0,00	0,00	0,11	0,00	1,89	0,07	0,00	0,00	1,44	0,05
<b>N-P</b>	0,81	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	4,32	0,16	0,54	0,02	1,62	0,06
<b>N-S</b>	0,36	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,17	0,04	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>P-A</b>	4,39	0,16	39,97	1,45	4,32	0,16	17,11	0,62	25,51	0,92	6,35	0,23	11,57	0,42	13,94	0,50
<b>P-B</b>	163,40	5,91	222,70	8,06	72,66	2,63	139,37	5,05	142,72	5,17	237,24	8,59	123,97	4,49	197,76	7,16
<b>P-N</b>	0,63	0,02	0,18	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	5,49	0,20	0,54	0,02	1,98	0,07	2,88	0,10
<b>P-S</b>	10,58	0,38	130,86	4,74	28,35	1,03	4,84	0,18	71,60	2,59	15,57	0,56	18,72	0,68	16,38	0,59
<b>S-A</b>	9,99	0,36	0,90	0,03	6,76	0,24	11,49	0,42	2,52	0,09	5,31	0,19	1,71	0,06	8,75	0,32
<b>S-B</b>	69,05	2,50	17,29	0,63	10,98	0,40	52,63	1,91	1,44	0,05	53,85	1,95	3,60	0,13	85,02	3,08
<b>S-N</b>	0,04	0,00	0,09	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,09	0,00	0,09	0,00
<b>S-P</b>	162,65	5,89	20,53	0,74	23,12	0,84	135,87	4,92	7,44	0,27	62,05	2,25	20,53	0,74	154,81	5,60
<b>NO CAMBIO</b>	2168,07	78,48	2122,59	76,83	2533,31	91,70	2040,85	73,88	2173,44	78,68	2277,25	82,43	2158,05	78,12	1934,89	70,04
<b>TOTAL</b>	2762,55	100	2762,55	100	2762,55	100	2762,55	100	2762,55	100	2762,55	100	2762,55	100	2762,55	100

A: Antrópico, B: Bosque, P: Pasto, N: Nube, S= Suelo desnudo

Fuente: Elaboración propia



A: Antrópico, B: Bosque, P: Pasto, S= Suelo desnudo

*Figura 19.* Cambio de coberturas en área de estudio. Fuente: Elaboración propia

En general, en ambas veredas el mayor cambio se da de bosque a pasto (con rangos entre 0,44% y 13,67%), seguido de pasto a bosque (con rangos entre 2,63% y 8,59%) y de suelo a pasto (con rangos entre 0,27% y 5,89%). Los cambios a cobertura antrópica presentan valores menores a 1,24%, con un promedio de 0,34%. Entre las diferentes imágenes se presentan variaciones y saltos fuertes que dificultan el análisis y no permiten dar resultados muy precisos. Sin embargo, se pueden hacer algunas inferencias.

Como se observa en la Figura 20, la cobertura bosque ha presentado una leve pérdida de área en el consolidado del tiempo estudiado, aportando mayoritariamente al crecimiento de la cobertura pasto. A pesar de algunos picos, se observa que el cambio de bosque a cobertura antrópica va en aumento. Con respecto al cambio de bosque a suelo no se puede concluir nada pues la gráfica es muy variable.

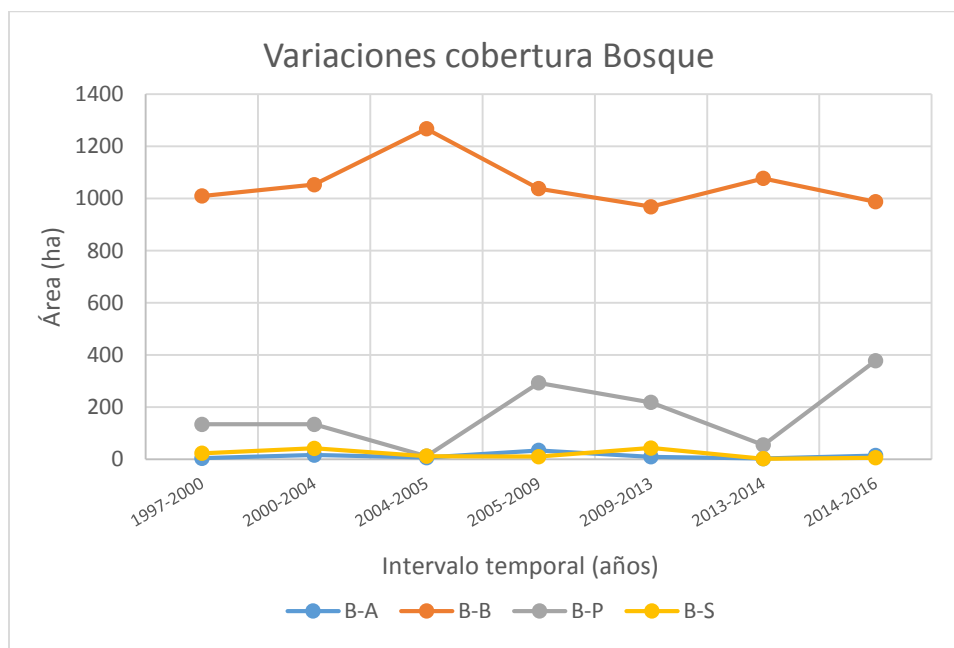


Figura 20. Variación de la cobertura Bosque. Fuente: Elaboración propia

Como se observa en la Figura 21, la cobertura Pasto ha presentado una ganancia durante tiempo estudiado presentando una disminución entre 2005-2013 para luego ganar nuevamente área. En el periodo de pérdida de área se ve una leve ganancia en la cobertura de bosque, lo cual puede indicar que pudo haber una regeneración de la cobertura de bosque en estadios tempranos llegando a presentar áreas con vegetación secundaria (posiblemente baja dado el intervalo de tiempo corto). El cambio de cobertura de pasto a antrópica también tiene una leve tendencia a ser creciente.

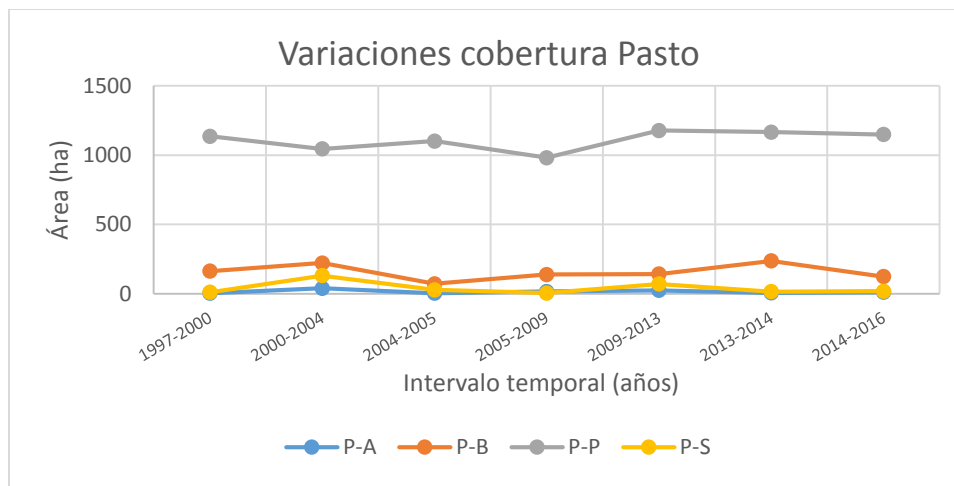


Figura 21. Variación de la cobertura Pasto. Fuente: Elaboración propia

Como se observa en la Figura 22, el algoritmo arrojó para la cobertura suelo múltiples saltos sin poderse observar una tendencia en los cambios a otras coberturas. Podría decirse en términos generales, por la línea de “suelo a suelo”, que se presenta un crecimiento sostenido moderado.

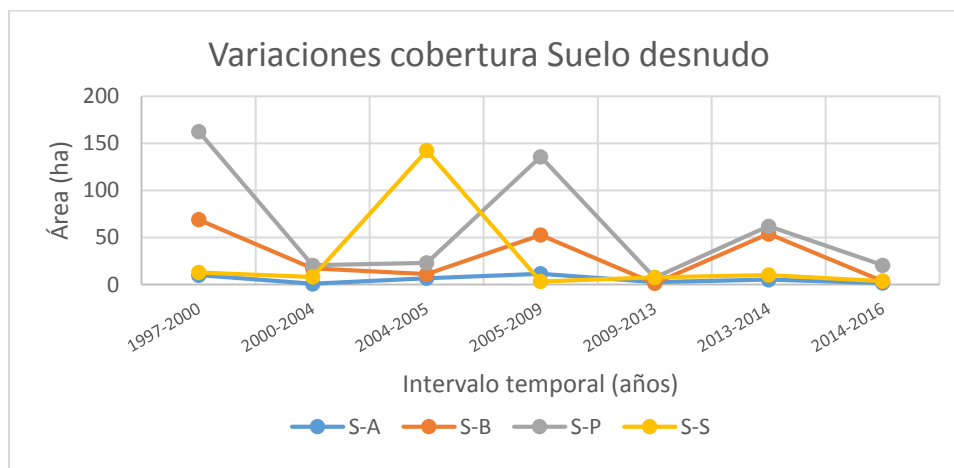


Figura 22. Variación de la cobertura Suelo desnudo. Fuente: Elaboración propia

Como se observa en la Figura 23, la cobertura antrópico ha presentado un continuo crecimiento durante el intervalo estudiado, evidenciado en la línea azul. Esta cobertura ha presentado dificultades en los métodos empleados para su determinación, debido a sus altos



niveles de reflectancia. Estos, en algunos casos, se pueden confundir con los valores de las nubes y de suelo desnudo generando valores errados. La línea de cambio de antrópico a pasto (gris) se presenta creciente, lo cual no es coherente con la realidad observada en ambas veredas.

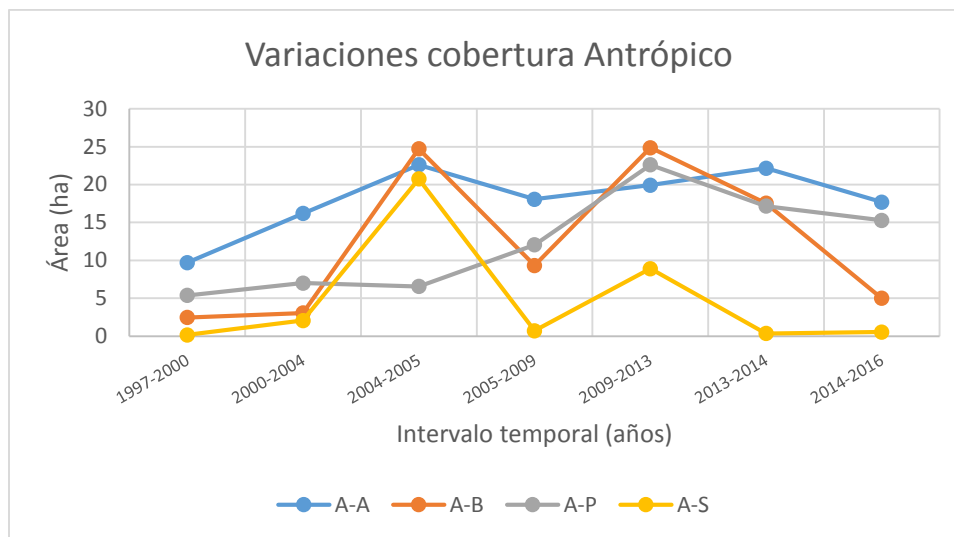


Figura 23. Variación de la cobertura antrópico. Fuente: Elaboración propia

#### 6.4 Mapas de coberturas según análisis de ortofotografías

A continuación, se presentan los mapas de coberturas para los años 2004, 2007 y 2015, para las veredas Las Palmas y Pantanillo, obtenidos mediante fotointerpretación.

##### 6.4.1 Mapa de cobertura año 2004.

Esta es la imagen del primer año analizado del estudio, con ella se tendrá la base para observar y discutir los diferentes cambios observado en el territorio con una gran precisión debido a la alta calidad del insumo y su excelente resolución espacial. Como se puede observar en la Figura 24 el uso de suelo predominante es agropecuario, lo que se expresa en el alto porcentaje de pastos existentes concentrados mayormente en la zona central y por las actividades agrícolas (diferentes tipos de cultivos y usos para especies menores y mayores) identificadas en la parte norte de la vereda Pantanillo. Las zonas de bosque se concentran hacia el sector occidental que está limitado por la vía Las Palmas como principal agente fragmentador de la cobertura (zona que ha sido considerada por el municipio como protección), en la parte central por las zonas de pastos como cercas vivas y bosques de galería, y hacia los límites con el

municipio de El Retiro predominantemente. La cobertura antrópica se encuentra fuertemente concentrada en el sector del alto Las Palmas, siendo la zona divisoria de aguas entre el valle del Aburrá (vertiente occidental) y el valle de San Nicolás (vertiente oriental) la de mayor presencia de esta cobertura, representada por un fuerte desarrollo urbanístico, casas y zonas comerciales, estando en una locación alejada a las vías principales, lo que es una reacción natural de este tipo de coberturas. La presencia de suelo desnudo está asociada mayormente a la cobertura de cultivo y localmente a la antrópica, el primero nos indica una preparación del suelo para procesos agrícolas y el segundo se debe al proceso de remoción de la cobertura vegetal y del suelo para la preparación del terreno para el inicio de actividades de construcciones civiles.

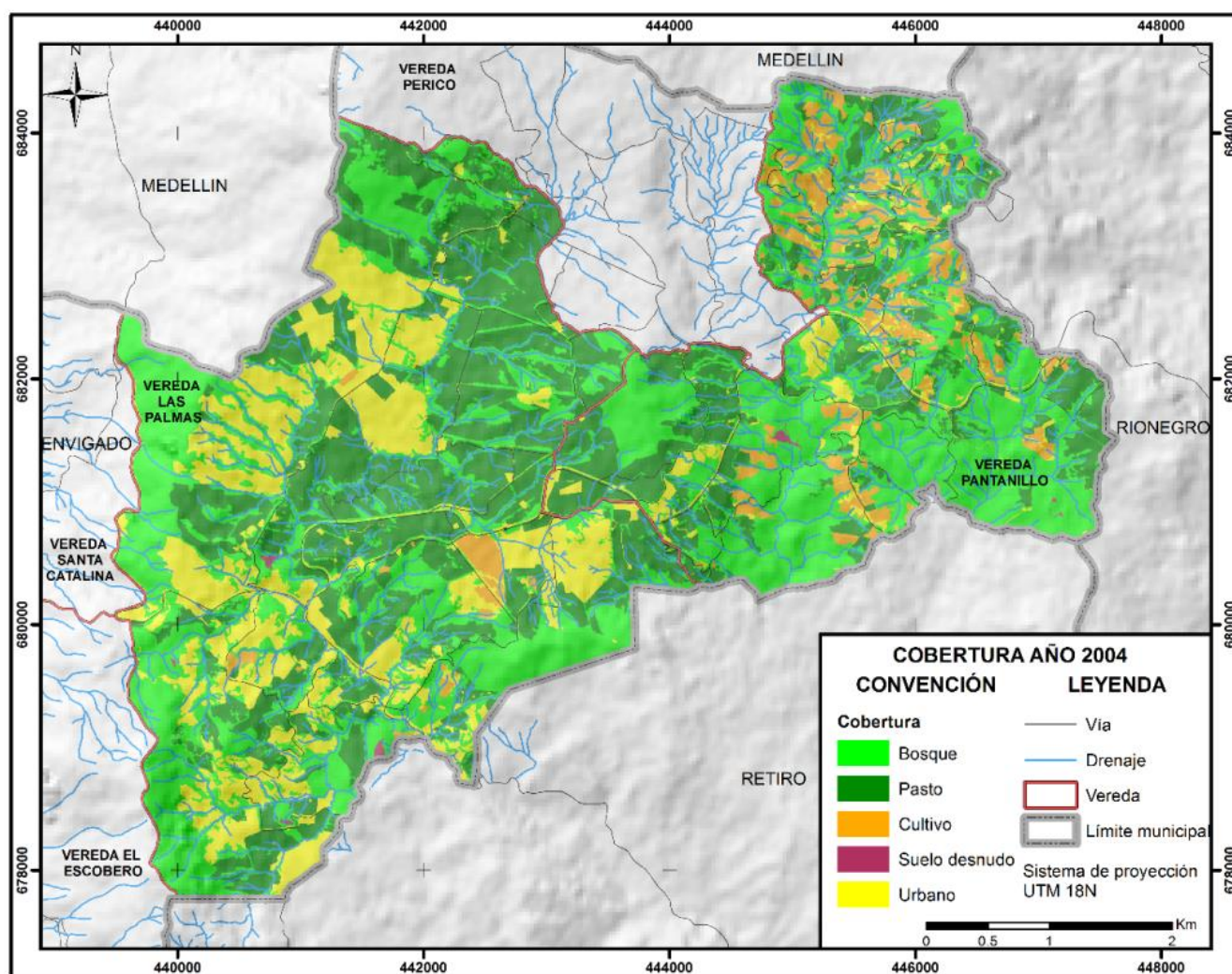


Figura 24. Mapa de coberturas año 2004. Fuente: Elaboración propia

### 6.4.2 Mapa de cobertura año 2007.

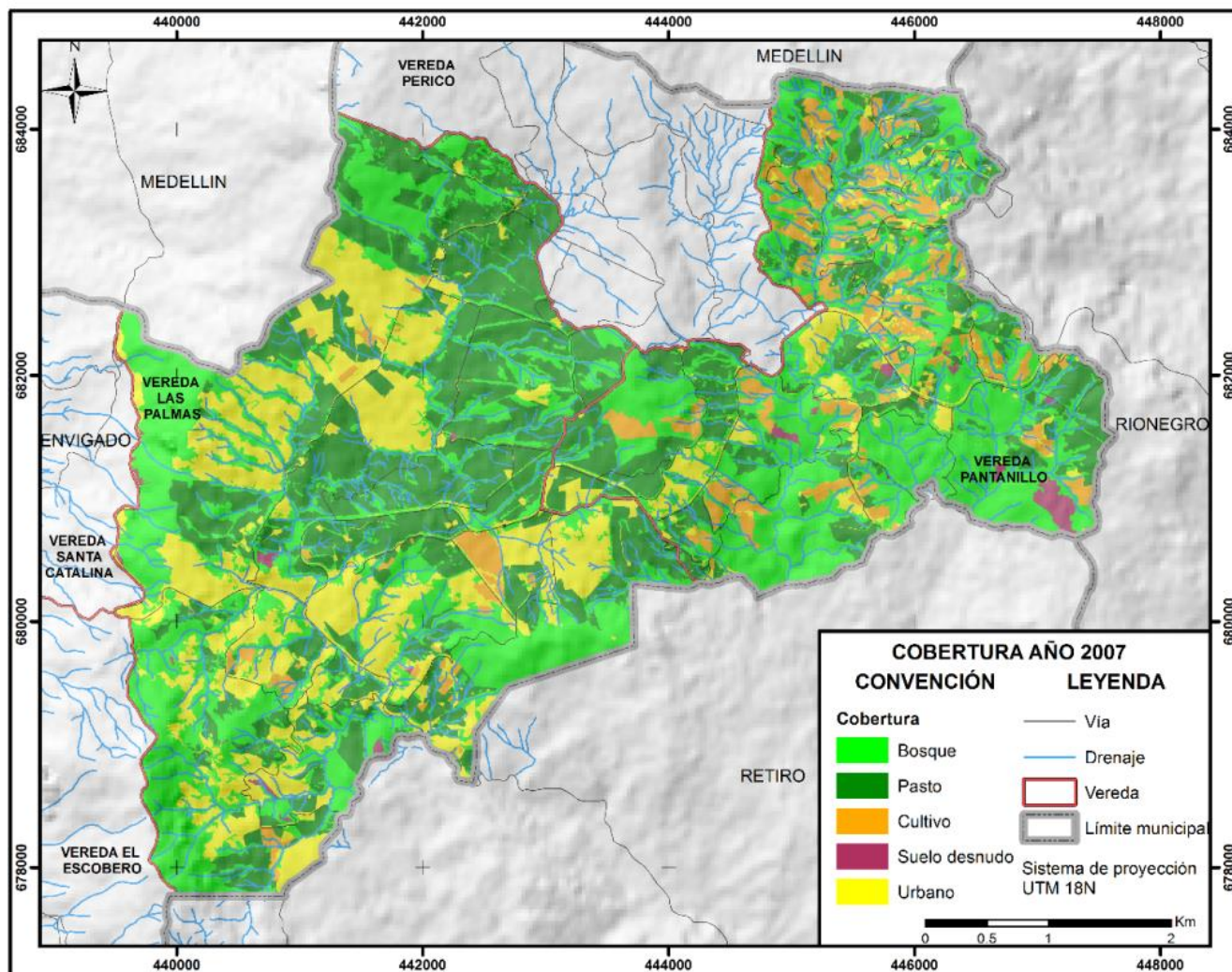


Figura 25. Mapa de coberturas año 2007. Fuente: Elaboración propia

En la Figura 25 se observa que continúa predominando el uso de suelo agropecuario, expresado en el alto porcentaje de pastos existentes concentrados mayormente en la zona central y por actividades agrícolas (diferentes tipos de cultivos y usos para especies menores y mayores) ubicada en la parte norte de la vereda Pantanillo, pero con un crecimiento importante hacia el occidente con el límite de la vereda Las Palmas. Las zonas de bosque continúan con la misma distribución espacial, pero con pérdida de área en beneficio de los pastos y del desarrollo urbanístico. La cobertura antrópica sigue fuertemente concentrada en el sector del alto Las

Palmas con una distribución espacial que muestra una acentuada tendencia norte-sur, siendo la zona divisoria de aguas entre el valle del Aburrá (vertiente occidental) y el valle de San Nicolás (vertiente oriental) la de mayor presencia de esta cobertura representada por un fuerte desarrollo urbanístico, casas y zonas comerciales, estando en una locación aledaña a las vías principales, lo que es una reacción natural de este tipo de coberturas. La presencia de suelo desnudo se asocia a la preparación del suelo para procesos productivos agrícolas en la vereda Pantanillo.

### **6.4.3 Mapa de cobertura año 2015.**

Como se puede observar en las interpretaciones de las imágenes satelitales y en las ortofotografías aéreas (Figura 26), el principal uso del suelo es agropecuario. Sin embargo, se ha presentado una pérdida importante del área destinada para esta actividad económica en beneficio del crecimiento urbano. Esta cobertura está expresada en los pastos existentes concentrados en la zona central (validados durante las diferentes fotografías analizadas) y está fuertemente influenciada por las vías para poder acceder a estas franjas. Las zonas de bosque se concentran hacia el sector occidental, limitado por la vía Las Palmas, unos relictos importantes de bosques de galería, cercas vivas en el centro de la vereda Las Palmas y hacia los límites con el municipio de El Retiro y localmente con el municipio de Medellín. La cobertura antrópica se encuentra fuertemente nucleada en el sector del alto Las Palmas, cerca de la Universidad EIA, y muestra un fuerte desarrollo urbanístico aledaño a las vías principales, siendo esto una consecuencia natural de este tipo de coberturas por el fácil acceso al sector. La distribución espacial posee una predisposición norte-sur siendo la zona divisoria de aguas entre el valle del Aburrá (vertiente occidental) y el valle de San Nicolás (vertiente oriental) la de mayor presencia de esta cobertura, representada por un fuerte desarrollo urbanístico, casas y zonas comerciales.



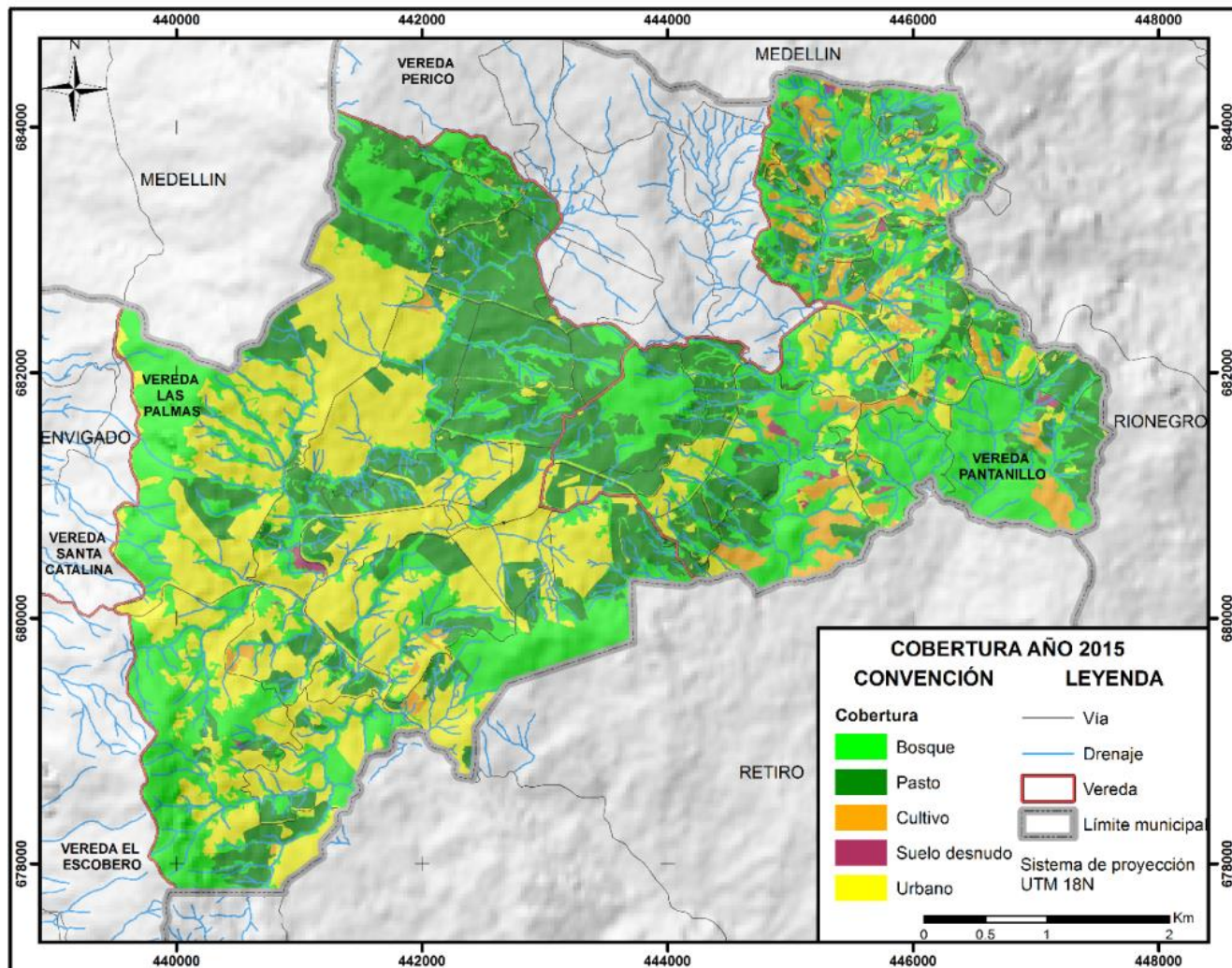


Figura 26. Mapa de coberturas año 2015. Fuente: Elaboración propia

La cobertura de cultivos, como se puede entender, está ubicada en la parte norte de la vereda Pantanillo con una pérdida de área en beneficio del crecimiento de los pastos, pero con un grado de preservación importante. La presencia de suelo desnudo está asociada mayormente a la cobertura de cultivo en la vereda Pantanillo y localmente en la zona urbana del Alto de Las Palmas. Estas dos locaciones diferentes se pueden interpretar como el proceso de remoción de la cobertura vegetal y del suelo para la preparación del terreno para el inicio de actividades de construcciones civiles (muy marcado en la zona del alto de Las Palmas y en áreas colindantes con el *Mall* de Indiana) en el primer sector, y en el segundo se debe a la preparación del suelo

para procesos agrícolas, esto muy resaltado en la vereda Pantanillo donde se encuentra muy marcada las áreas de cultivos y procesos agropecuarios.

## 6.5 Cambio de coberturas según análisis de ortofotografías

A continuación, se presentan las imágenes obtenidas del análisis dinámico de coberturas, para los diferentes intervalos de tiempo: 2004-2007, 2007-2015, 2004-2015.

### 6.5.1 Mapa de cambio de cobertura años 2004-2007

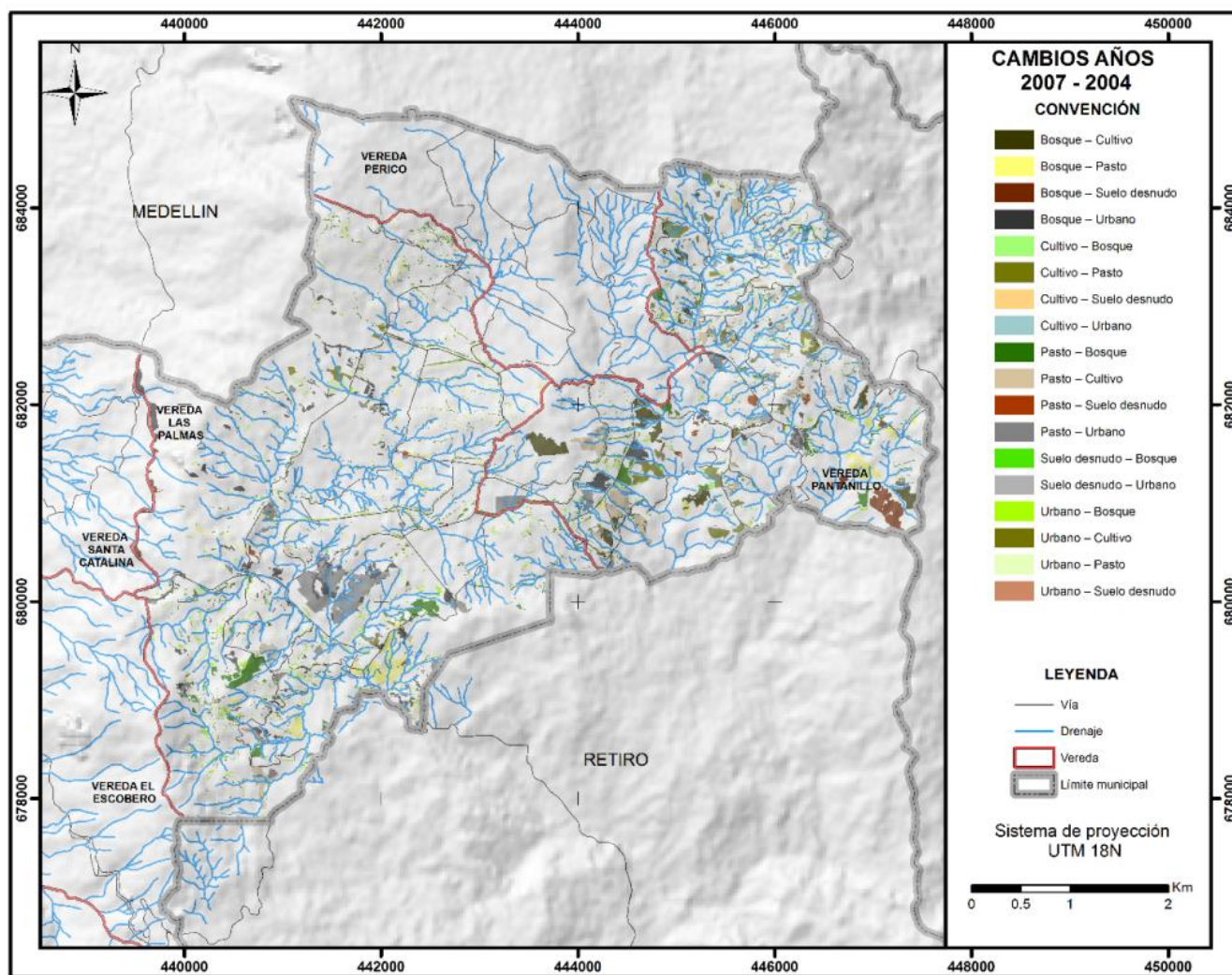


Figura 27. Mapa de cambios de coberturas años 2004 a 2007. Fuente: Elaboración propia



Como se puede observar en la Figura 27, entre los cambios observados en el intervalo de tiempo 2004 – 2007 (3 años) se tiene que la cobertura de bosque ha perdido un área importante a costa de un incremento en las coberturas de pasto y antrópica, estos cambios son más significativos en la vereda Pantanillo.

### 6.5.2 Mapa de cambio de cobertura años 2007-2015.

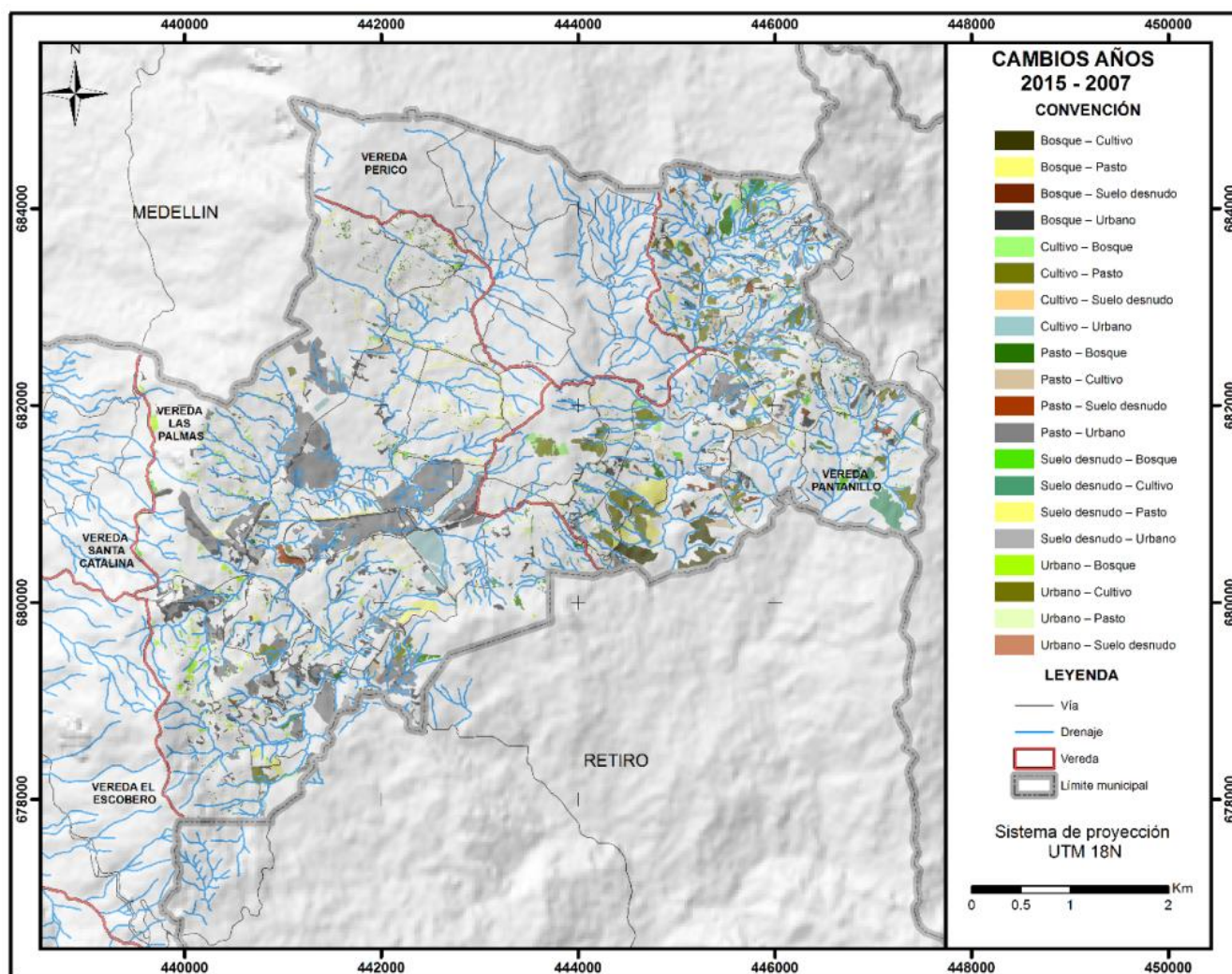


Figura 28. Mapa de cambios de coberturas años 2007 a 2015. Fuente: Elaboración propia

Como se puede observar en la Figura 28 entre los cambios observados en el intervalo de tiempo 2007 – 2015 (8 años) se tiene que la cobertura de bosque sigue perdiendo una gran cantidad de área a costa del crecimiento para la cobertura pasto y la cobertura antrópica como tendencia. Estos cambios son más significativos en la vereda Las Palmas para el aumento de las edificaciones y actividades antrópicas, y en la vereda Pantanillo para el crecimiento de pastos y áreas cultivadas.

### 6.5.3 Mapa de cambio de cobertura años 2004-2015.

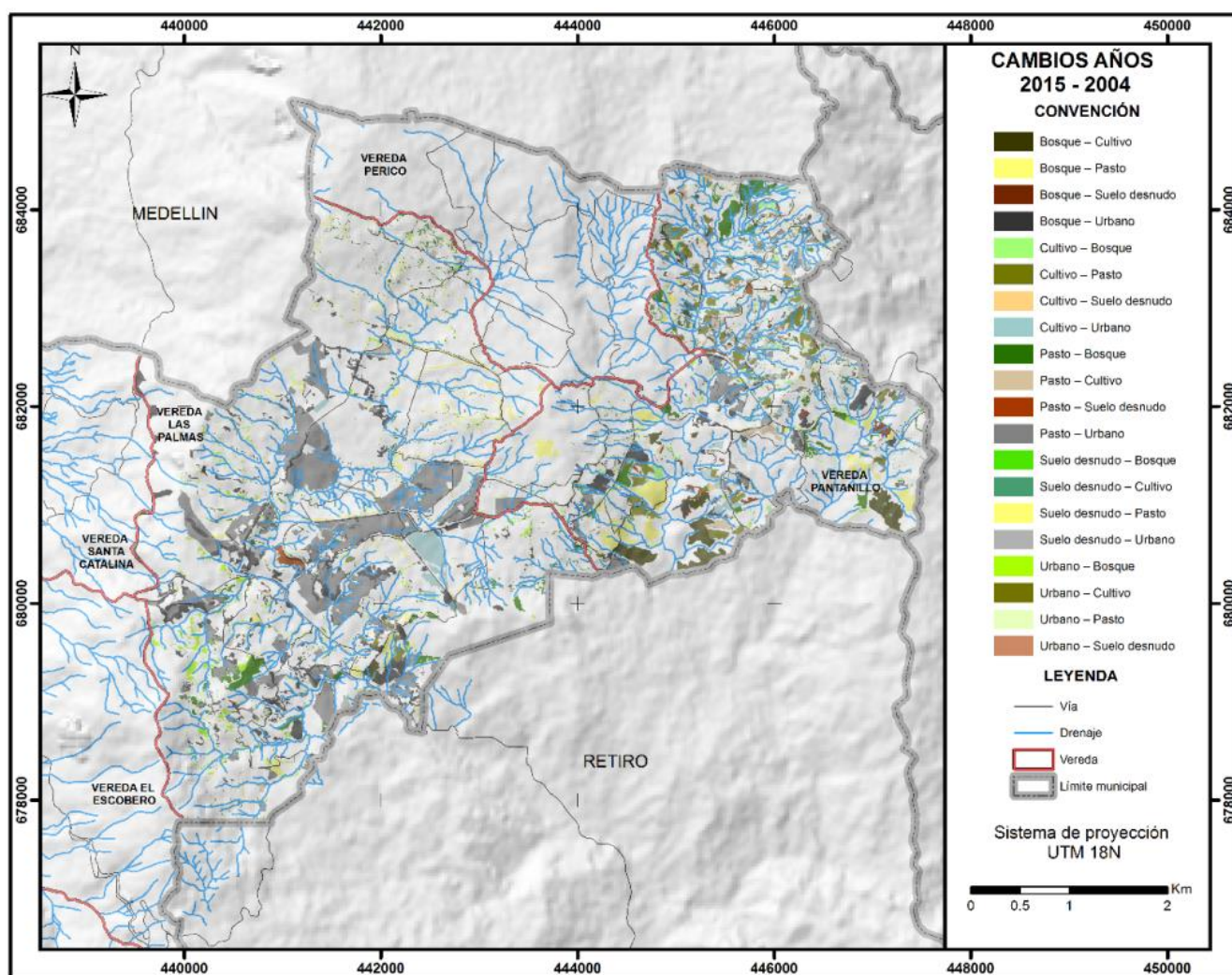


Figura 29. Mapa de cambios de coberturas años 2004 a 2015. Fuente: Elaboración propia



Como se puede observar en la Figura 29 entre los cambios observados en el intervalo de tiempo 2004 – 2015 (11 años) se tiene que la cobertura de bosque perdió una gran parte de área en favor del crecimiento para el pasto y área cultivada en la vereda Pantanillo, y de área de actividades antrópicas en la vereda Las Palmas.

En la Figura 30 y en la Tabla 27 se presenta la variación en áreas para las diferentes coberturas analizadas durante estos once años.

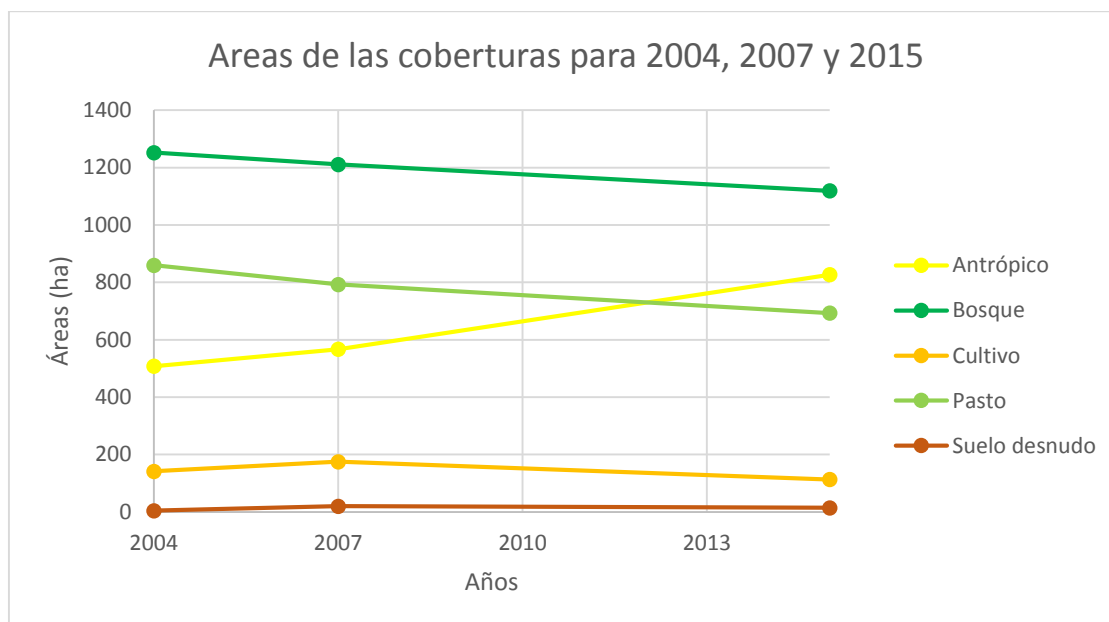


Figura 30. Áreas de coberturas para 2004, 2007 y 2015 en las ortofotografías. Fuente: Elaboración propia

Tabla 27

Áreas y porcentajes de coberturas para cada año para ortofotografías

Coberturas	2004		2007		2015	
	Área (ha)	%	Área (ha)	%	Área (ha)	%
urbano	507,87	18,36	567,19	20,50	826,64	29,88
Bosque	1252,73	45,29	1211,28	43,79	1119,12	40,46
Cultivo	141,23	5,11	175,12	6,33	113,02	4,09
Pasto	859,94	31,09	793,03	28,67	692,97	25,05
Suelo desnudo	4,50	0,16	19,64	0,71	14,53	0,53

Fuente: Elaboración propia

Como se observa en la Figura 30 las coberturas bosque y pasto han presentado una clara disminución en su área total y el porcentaje de la cobertura antrópica ha crecido, lo cual es consecuente con el fuerte dinamismo urbanizador presente en la vereda Las Palmas y que se ha expresado en los múltiples proyectos inmobiliarios en el sector.

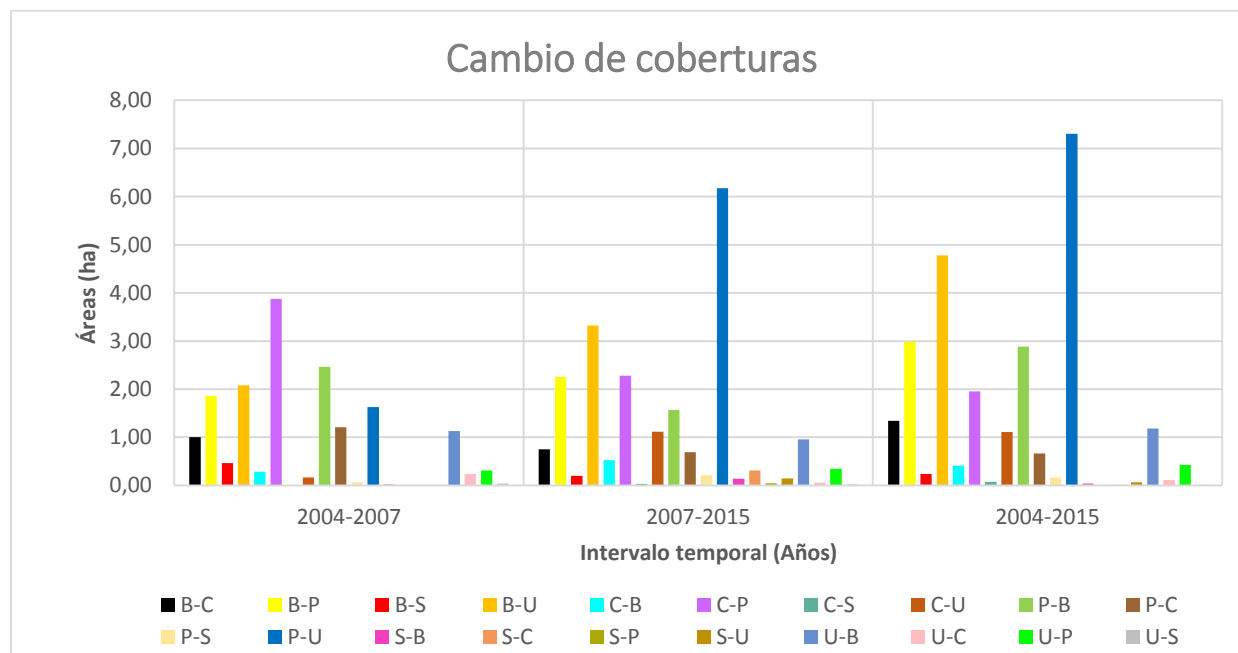
La pérdida de la cobertura bosque es del 10 %, con una ratio de aproximadamente 1% anual en el periodo 2004 - 2015. Como se describe en la Tabla 27, porcentualmente la pérdida de bosque ha beneficiado al área antrópica, que tuvo un aumento de 47.98 ha, seguido de los cultivos con un crecimiento absoluto de 34.83 ha, estando en tercer lugar el pasto con una pérdida total de 166.97 ha lo que equivale a un 19.42%.

En la interpretación de ortofotografías fue posible identificar una cobertura denominada “cultivo”, no clasificada en las imágenes satelitales debido a su baja separabilidad con respecto a las otras coberturas elegidas. La cobertura de cultivos tiene una fuerte presencia en la vereda Pantanillo, destacada por su vocación tradicional agrícola y despensa de las urbes circundantes y por no presentar cambios en el uso del suelo del POT del 2011. En la figura 30 se observa que esta cobertura presenta una leve disminución del 19.97% al final del intervalo de tiempo estudiado, y que se da principalmente en el sector norcentral de la vereda Pantanillo. Se puede deducir que esta cobertura puede recuperarse fácilmente en el tiempo por los rasgos visuales identificados en las imágenes como, por ejemplo, que los campos aledaños a los cultivos muestran signos de zonas de labranzas en estados de posible pausa con una cobertura incipiente de pasto, y que antes han sido suelos destinados a cultivos (evidenciado por los sacos de fertilizantes y enclaves no cartografiados de cultivos).

Los pastos son otra cobertura que ha presentado una disminución acentuada en el tiempo de estudio. Sin embargo, esta disminución puede ser menor a la observada si se tienen en cuenta las áreas aledañas a las casas cuyos usos son meramente recreativos y no generan ninguna actividad agropecuaria importante. A pesar de esto, el área global de esta cobertura presenta una disminución importante ya que esta está destinada a actividades como la ganadería de carne y leche, por lo que una disminución real porcentual indica cambios importantes en las actividades económicas desarrolladas en el territorio y un cambio en el paradigma de la población asentada en este.

Algunas coberturas han presentado una disminución real en su área, implicando una ganancia en el área de otro tipo de coberturas. Es así como las coberturas antrópicas y suelo desnudo han presentado significativas ganancias en este intervalo de tiempo. Las obras antrópicas, descritas principalmente como parcelaciones campestres, grandes desarrollos inmobiliarios, centros de comercio, equipamiento urbano, entre otras, presentan una ganancia de área del 62%. Asociada íntimamente a esta cobertura está el suelo desnudo, el cual posiblemente se encuentra asociado a aquellos cultivos transitorios en los cuales los métodos de siembra y recolección requieren cantidades significativas de suelo con poca o nula presencia de material vegetal que lo cubra parcial o totalmente, logrando con ello similitudes en la respuesta espectral en gran medida los métodos constructivos empleados en el marcado desarrollo de infraestructura observado en la vereda Las Palmas. Lo anterior da indicios de un posible incremento del área antrópica en la zona de estudio en los próximos años.

En la Figura 31 y en la Tabla 28 se presentan las áreas de los cambios de coberturas para el intervalo de tiempo analizado con las tres ortofotografías.



B: Bosque, C: Cultivo, P: Pasto, U: Urbano, S: Suelo

Figura 31. Cambios de coberturas entre 2004, 2007 y 2015 en las ortofotografías. Fuente: Elaboración propia

Tabla 28

*Áreas de cambios de coberturas para intervalo analizado con ortofotografías*

Cambio de Coberturas	2004-2007		2007-2015		2004-2015	
	Áreas (ha)	%	Áreas (ha)	%	Áreas (ha)	%
Bosque-Bosque	1101,68	39,88	1029,36	37,26	992,83	35,94
Bosque-Cultivo	27,77	1,01	20,69	0,75	37,09	1,34
Bosque-Pasto	51,42	1,86	62,30	2,26	82,45	2,98
Bosque-Suelo	12,76	0,46	5,47	0,20	6,64	0,24
Bosque-Urbano	57,43	2,08	91,83	3,32	132,04	4,78
Cultivo-Bosque	7,94	0,29	14,52	0,53	11,31	0,41
Cultivo-Pasto	107,08	3,88	62,91	2,28	54,03	1,96
Cultivo-Cultivo	21,42	0,78	65,62	2,38	43,14	1,56
Cultivo-Suelo	0,03	0,00	0,96	0,03	1,93	0,07
Cultivo-Urbano	4,56	0,17	30,87	1,12	30,63	1,11
Pasto-Bosque	68,14	2,47	43,40	1,57	79,74	2,89
Pasto-Cultivo	33,44	1,21	19,01	0,69	18,35	0,66
Pasto-Pasto	710,50	25,72	553,15	20,02	554,32	20,07
Pasto-Suelo	1,79	0,06	5,82	0,21	4,61	0,17
Pasto-Urbano	44,91	1,63	170,59	6,17	201,76	7,30
Suelo-Bosque	0,61	0,02	3,85	0,14	1,06	0,04
Suelo-Cultivo	0,00	0,00	8,68	0,31	0,26	0,01
Suelo-Pasto	0,00	0,00	1,35	0,05	0,36	0,01
Suelo-Suelo	3,87	0,14	1,74	0,06	1,05	0,04
Suelo-Urbano	0,01	0,00	4,00	0,14	1,77	0,06
Urbano-Bosque	31,27	1,13	26,49	0,96	32,67	1,18
Urbano-Cultivo	6,60	0,24	1,57	0,06	3,14	0,11
Urbano-Pasto	8,62	0,31	9,61	0,35	11,77	0,43
Urbano-Suelo	1,16	0,04	0,52	0,02	0,28	0,01
Urbano-Urbano	459,52	16,63	528,23	19,12	459,32	16,63
<b>TOTAL</b>	<b>2762,55</b>	<b>100,00</b>	<b>2762,55</b>	<b>100,00</b>	<b>2762,55</b>	<b>100,00</b>

Fuente: Elaboración propia

Como se puede observar en la Tabla 28 y en la Figura 31, los principales cambios de coberturas en todos los intervalos analizados son: de pasto a urbano (antrópico) con un 7,3% de área para el intervalo 2004-2015, el cambio de bosque a urbano (antrópico) con un 4,78%, el cambio de bosque a pasto con un 2,98% , el cambio de pasto a bosque con un 2,89%, el cambio de cultivos a pastos con un 1,96%, el cambio de bosque a cultivo con un 1,34%, el cambio de

urbano a bosque con un 1,18%, el cambio de cultivos a urbano (antrópico) con un 1,11% y el cambio entre pasto y cultivos con un 0,66%.

## 6.6 Índices NDVI y BU

El cálculo de los índices NDVI (índice normalizado de vegetación) y BU (índice de área construida) se realizó para las seis imágenes Landsat en las que fue posible aplicarlo. En la Figura 32 se presenta el índice NDVI, y en la Figura 33 el índice BU para el área de estudio en los años en que fueron analizados.

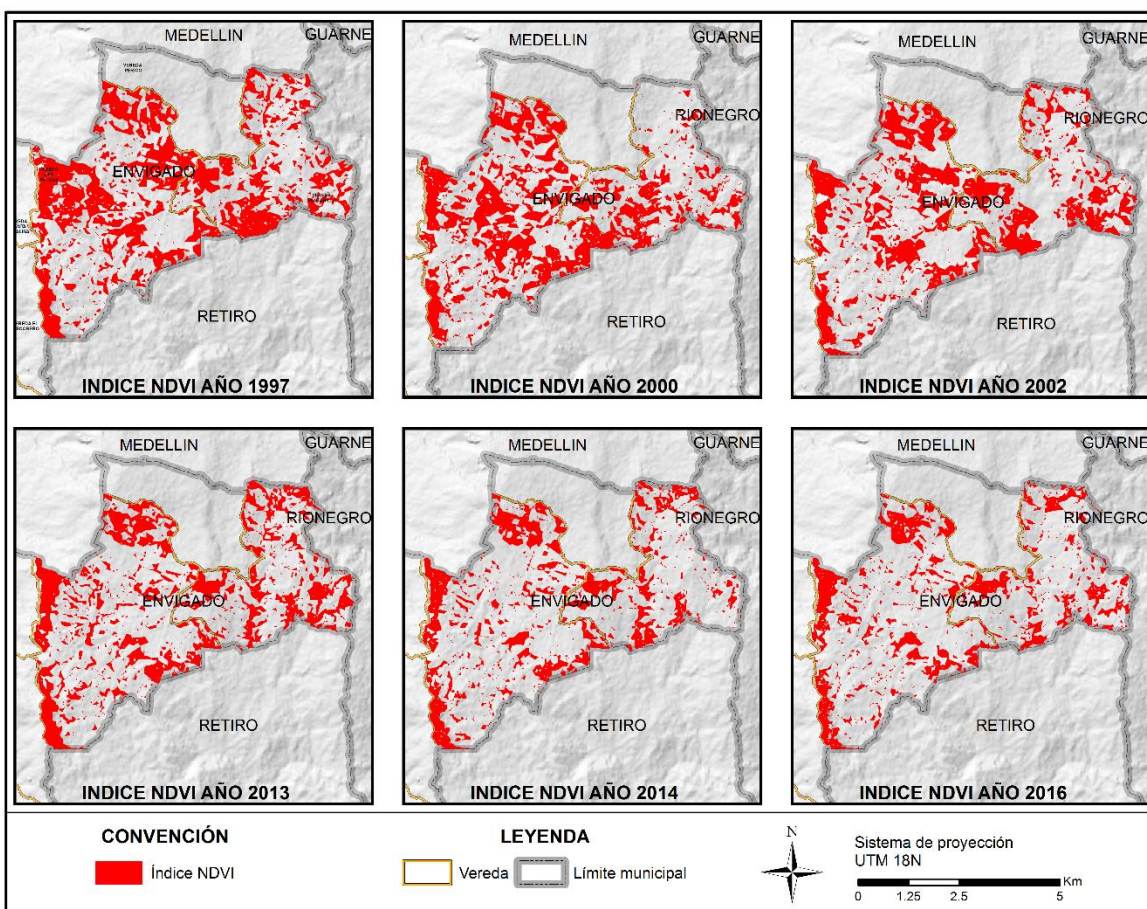


Figura 32. Índice NDVI. Fuente: Elaboración propia

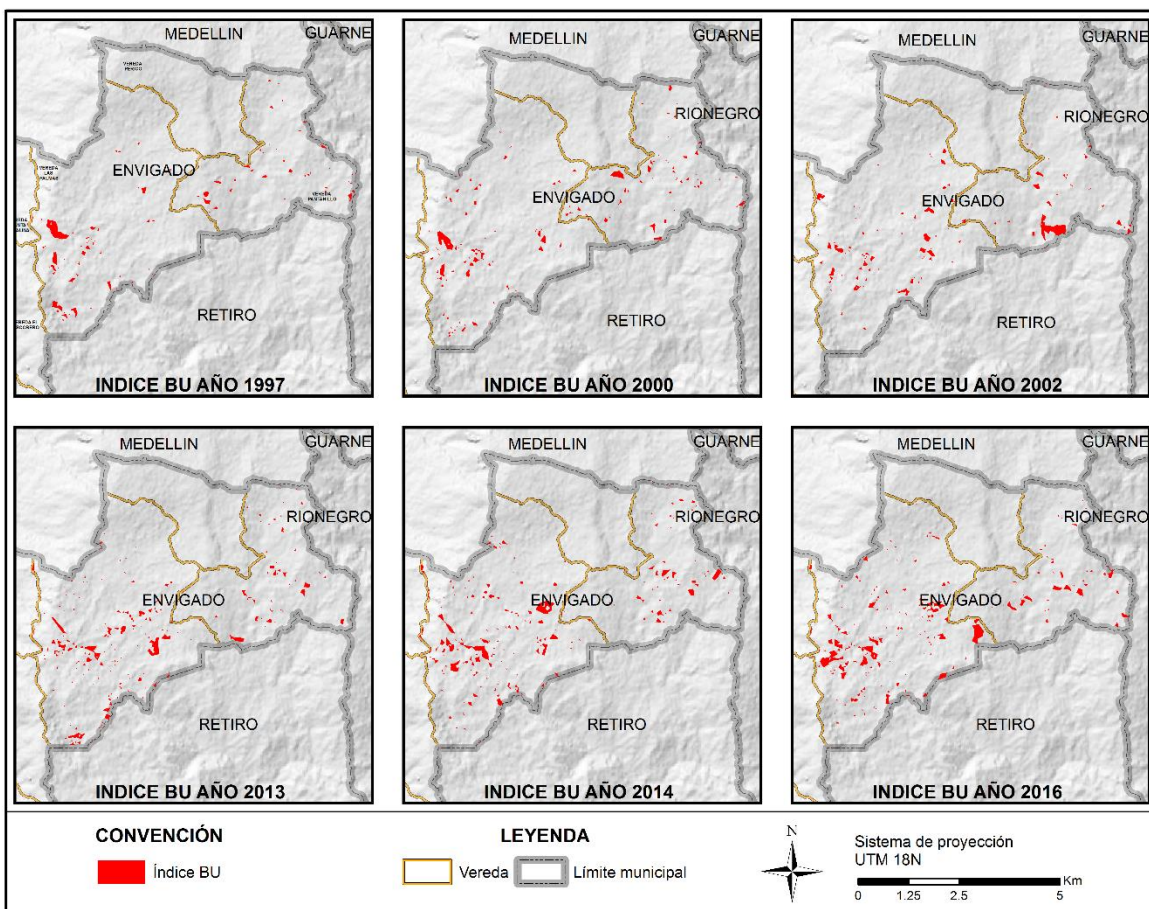


Figura 33. Índice BU. Fuente: Elaboración propia

Estos índices fueron obtenidos y analizados escena por escena, revisando para cada uno los intervalos en los cuales es válida su aplicación, esto debido a la variabilidad en los resultados y a la imposibilidad de obtener un rango promedio que sea válido para todos los años de estudio. Sin embargo, los rangos empleados están dentro de valores con poca oscilación, los cuales se describen para NDVI en órdenes mayores a 0.7 y para el BU mayores a -0.55.

Del cálculo de estos índices pueden hallarse las áreas correspondientes a cobertura boscosa y a coberturas antrópicas para los años analizados. Los resultados se presentan en la Tabla 29 y en la Figura 34.



Tabla 29

Áreas por año de coberturas según índices NDVI y BU

Cobertura	Área (ha)					
	1997	2000	2002	2013	2014	2016
Bosque	1064,4755	959,97686	879,86763	827,94716	638,01885	597,8478
Antrópica	40,463058	46,440305	49,673394	61,622611	74,506409	82,448279

Fuente: Elaboración propia

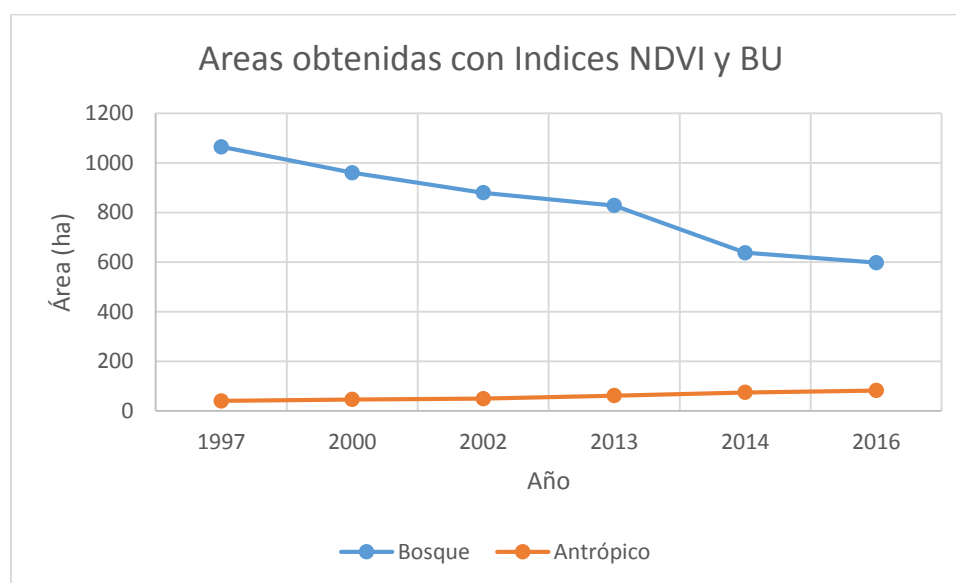


Figura 34. Variación de áreas para cobertura bosque y antrópica según índices. Fuente: Elaboración propia

Con el NDVI se puede diferenciar la vegetación con una fuerte presencia arbórea que es diferente a los pastos. La información arrojada por este índice indica una pérdida continua de la cobertura boscosa durante los años estudiados del 43.84% o 466.63 ha netas. Al contrastar estos valores con los obtenidos con el empleo de las ortofotografías, se observa que los resultados del NDVI muestran una pérdida de cobertura mayor, haciendo que la utilización de este método deba hacerse de manera cuidadosa pues si bien nos reafirma la tendencia de disminución en las coberturas, sus valores pueden ser una fuente de error al momento de la interpretación.

El índice de área construida, o BU por su sigla en inglés, da una visión de cómo ha sido el cambio en el territorio por las edificaciones desarrolladas en los diferentes años estudiados. La

información obtenida por este método muestra una relación con lo encontrado en el análisis manual de interpretación con ortofotografías evidenciando un claro interés en el desarrollo de procesos inmobiliarios en el área de estudio. En el periodo de estudio se estimó un aumento del 203.76% en el área construida pasando de 40.46 ha a 82.45ha, con crecimiento del 10.53% interanual.

Estos dos índices se muestran como importantes fuentes de información que permiten la extracción fácil, rápida, oportuna y ágil de datos que permiten entender el comportamiento del crecimiento o decrecimiento de la cobertura analizada.

## **6.7 Estructura predial**

Como apoyo a los análisis realizados por teledetección, y con miras a aportar en la discusión, se hace un análisis de la estructura predial de las veredas Pantanillo y Las Palmas para los años 2010, 2011, 2016, 2017, a partir de la información predial descargada de la página de catastro de Antioquia en formato *Shape*. Se tomaron como base los rangos de tamaño de predios establecidos por el municipio de Envigado en el documento soporte de la formulación de política pública de desarrollo agropecuario para el año 2015. Los rangos utilizados en el estudio fueron los establecidos por la Resolución 9328 de 2007 para tamaños de UAF agrícola, mixta, ganadera y de protección, ajustados a las características observadas en la subdivisión predial y en el municipio.

En la Tabla 30 se observa que la estructura predial de Pantanillo, para los años con los que se contó con información, muestra un mayor número de predios en el rango entre 1 cuadra - 3.6 ha, con 155 predios en promedio (el 38,04% del total con el 29,09% del área), seguido del rango entre 2000 m<sup>2</sup> - 1 cuadra, con 134 predios (el 32,66% del total con 7,25% del total del área). Se resalta que el 22,23% del área total está ocupada por predios >27 ha y que constituyen solo el 0,67% de los predios, y que el 24,32% del área está ocupada por predios entre 5 y 16 ha, que representan solo el 7,24% del total de predios. Esto “denota concentración de la propiedad, no obstante, la proliferación de predios más pequeños es coherente con los resultados del índice de Gini, el cual, para el Municipio en el 2012, se acercaba a 0,874 (Cede (UNIANDES) – IGAC,



Universidad de Antioquia, 2012)” (Secretaría de Medio Ambiente y Desarrollo Agropecuario, 2015, p. 33).

Tabla 30

*Rangos estructura predial vereda Pantanillo*

Pantanillo	2010		2011		2016		2017		Promedio			
	No. Predios	Área	No. Predios	Área	No. Predios	Área	No. Predios	Área	No. Pred	% Pred	Área	% Área
<2000 m <sup>2</sup>	19	2,28	20	2,07	21	2,35	24	2,78	21	5,15	2,37	0,24
2000 m <sup>2</sup> - 1												
cuadra	83	38,76	149	81,11	151	81,58	153	82,36	<b>134</b>	32,66	70,95	<b>7,25</b>
1 cuadra-1 ha	73	58,81	37	33,53	37	33,53	40	36,35	47	11,63	40,56	4,14
1 ha - 3.6 ha	157	286,05	152	276,62	154	297,72	156	276,69	<b>155</b>	38,04	284,27	<b>29,03</b>
3.6 ha - 5 ha	16	68,77	16	67,42	15	63,61	15	62,90	16	3,81	65,68	6,71
5 ha- 16 ha	28	227,93	30	241,51	30	241,59	30	241,46	<b>30</b>	<b>7,24</b>	238,12	<b>24,32</b>
16 ha - 27 ha	4	77,83	3	53,06	3	53,06	3	53,87	3	0,80	59,45	6,07
>27 ha	2	220,23	3	217,72	3	217,72	3	215,11	<b>3</b>	<b>0,67</b>	217,69	<b>22,23</b>
TOTAL	382	980,7	410	973,0	414	991,2	424	971,53	408	100	979,1	100

Fuente: Elaboración propia a partir de información en formato *shapes* de predios del Municipio

Tabla 31

*Rangos estructura predial vereda Las Palmas*

Las Palmas	2010		2011		2016		2017		Promedio			
	No. Predios	Área	No. Predios	Área	No. Predios	Área	No. Predios	Área	No. Predio	% Pred	Área	% Área
<2000 m <sup>2</sup>	377	23,69	393	25,03	393	24,83	429	28,35	<b>398</b>	41,37	25,47	<b>1,49</b>
2000 m <sup>2</sup> - 1												
cuadra	239	118,1	309	142,4	290	139	342	163,2	<b>295</b>	30,467	140,7	<b>8,21</b>
1 cuadra-1 ha	46	41,64	50	45,5	41	37,31	51	46,15	47	4,885	42,65	2,491
1 ha - 3.6 ha	115	218,9	144	272,8	134	257,5	144	273,1	134	13,913	255,5	14,93
3.6 ha - 5 ha	18	76,48	18	77,42	18	76,95	21	90,46	19	1,9478	80,33	4,692
5 ha- 16 ha	45	408,5	51	459,6	52	464,5	57	514	51	5,312	461,7	<b>26,96</b>
16 ha - 27 ha	8	176,5	5	97,68	8	159,3	9	178,2	8	0,7816	152,9	8,933
>27 ha	12	602,8	13	547,8	12	517	14	543,8	13	1,3239	552,9	<b>32,29</b>
TOTAL	860	1666,6	983	1668,2	948	1676,4	1067	1837,3	965	236,69	1712,1	100

Fuente: Elaboración propia a partir de información en formato *shapes* de predios del Municipio

Como se observa en la Tabla 31, en la vereda Las Palmas hay un gran número de predios de extensión  $<2000 \text{ m}^2$  con un promedio de 398 predios, representando un 41,37% de la totalidad de los predios y con un 1,49% del área total, esto para los años con los que se contó información. Predios con un área entre  $2000 \text{ m}^2$  y 1 cuadra representan el 30,47% del total, representando 295 predios que ocupan un 8,21% del área total, esto muestra la alta fragmentación de la propiedad que se tiene en esta vereda. Se resalta que las mayores áreas se encuentran en los rangos  $>27 \text{ ha}$  con un 32,29% del área total y que los predios pequeños ocupan menor proporción del área, situación que podría ser potenciada en términos de protección ambiental ya que esta vereda es de importancia en la restauración ambiental del escarpe oriental del municipio (Secretaría de Medio Ambiente y Desarrollo Agropecuario Envigado, 2015).

Se puede observar que en ambas veredas hay una tendencia a la subdivisión predios, la cual es más evidente en la vereda Las Palmas y en predios de menores extensiones.

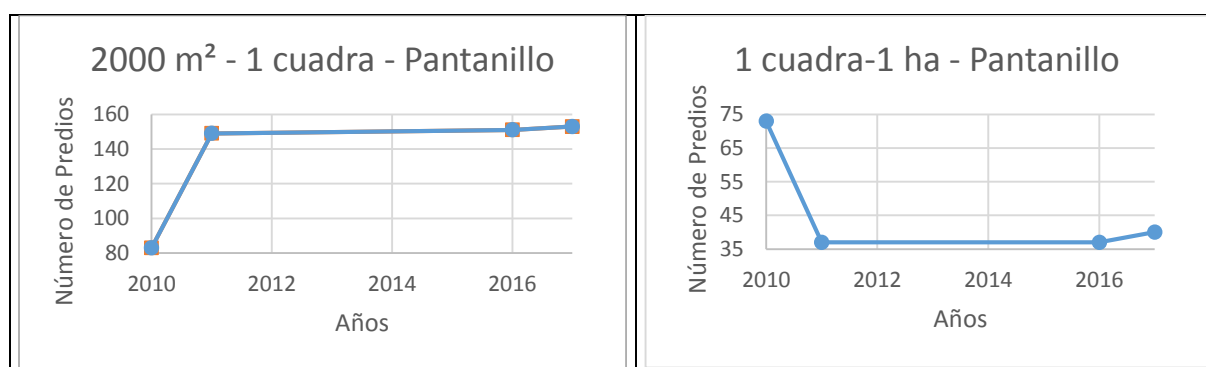


Figura 35. Número de predios vereda Pantanillo. Fuente: Elaboración propia.

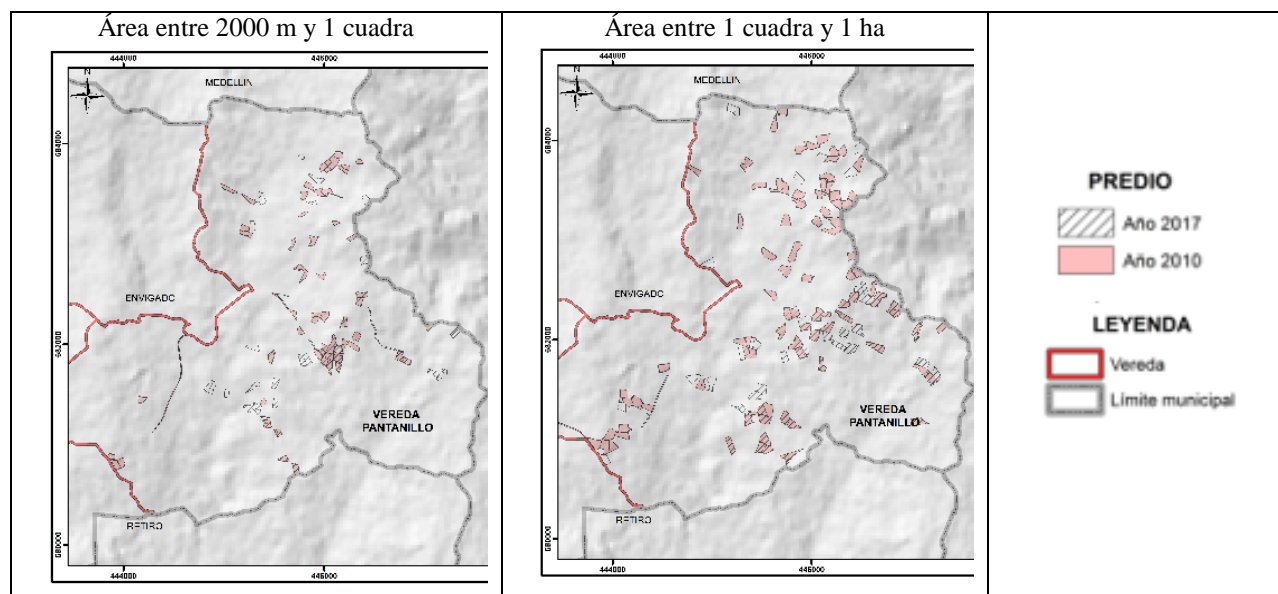


Figura 36. Distribución de predios en vereda Pantanillo entre 2010 y 2017. Fuente: Elaboración propia.

De la Figura 35 se observa que los cambios prediales más significativos en la vereda Pantanillo son los que reflejan la tendencia creciente en la división de predios con áreas comprendidas entre los  $2000 \text{ m}^2$  y una hectárea, así como la disminución del número de los predios comprendidos entre el intervalo de 1 cuadra a una hectárea, dicho cambio se registra principalmente en el transcurso de los años 2010 al 2011. En este intervalo de tiempo se aprecia cómo el número de los predios han aumentado en un 79.51 % para este primer intervalo, y han disminuido en un 50.68% las propiedades con áreas comprendidas entre una cuadra y una hectárea. En la Figura 36 se muestra que los cambios observados están cerca a los núcleos cuyas áreas son iguales. Lo que muestra un crecimiento de forma nucleada asociada fuertemente a la presencia de vías.

En la vereda Las Palmas los cambios más importantes ocurren en los siguientes intervalos, como se indica en la Figura 37:

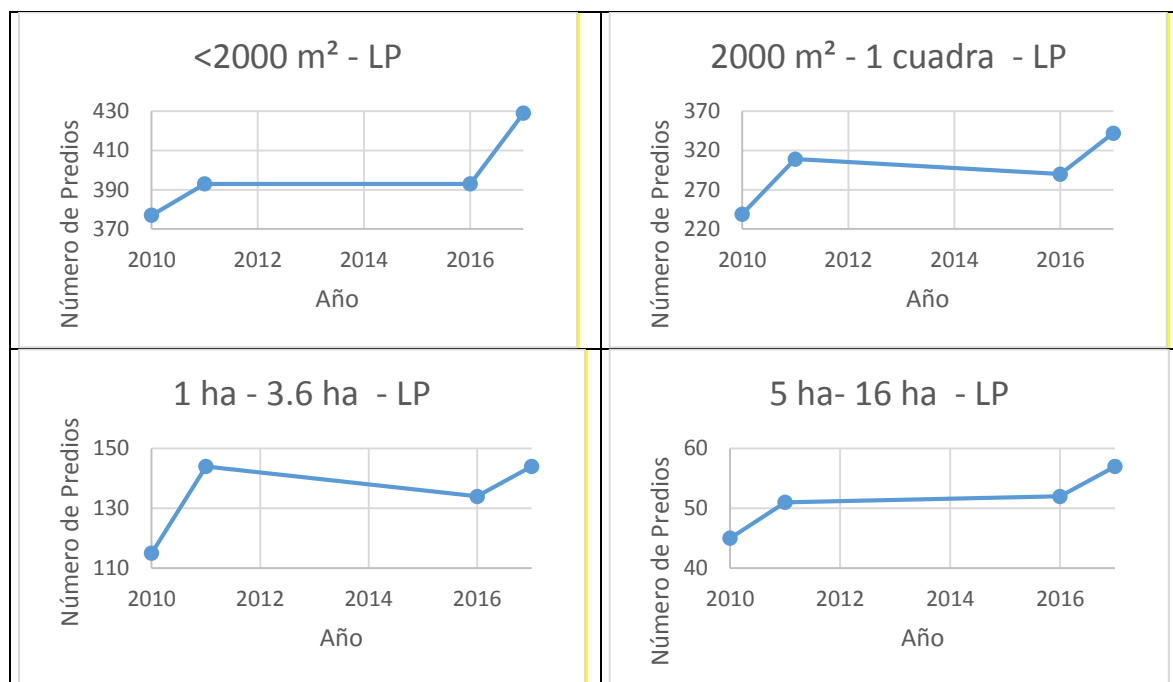


Figura 37. Número de predios vereda Las Palmas. Fuente: Elaboración propia.

Menores a  $2000\text{ m}^2$ : se puede observar como en los años reportados se presenta un incremento del 13% del total del área, siendo mayor en el periodo 2016 -2017 donde se registra un crecimiento del 9.16%.

$2000\text{ m}^2$  – 1 cuadra: esta categoría ha presentado el cambio más pronunciado con un incremento del 43.01%, siendo el intervalo de mayor aceleración el comprendido entre los años 2010 – 2011 con una ratio en la variación del 29.28%, seguido por el intervalo 2016 – 2017 con un 17.93%.

1ha – 3.6 ha: Este intervalo ha mostrado un crecimiento consolidado del 25.22% en el tiempo estudiado.

5 ha – 16 ha: el cambio en el rango de este intervalo es del 26.67%, siendo el segundo rango de predios con mayor crecimiento.

Como se muestra en la Figura 38, los cambios observados están cerca a los núcleos cuyas áreas son iguales mostrando con ello un crecimiento de forma nucleada fuertemente asociado a las vías. Estas áreas que han crecido están robustamente relacionadas con el alto de Las Palmas y su alto potencial para el desarrollo de parcelación de viviendas campestres

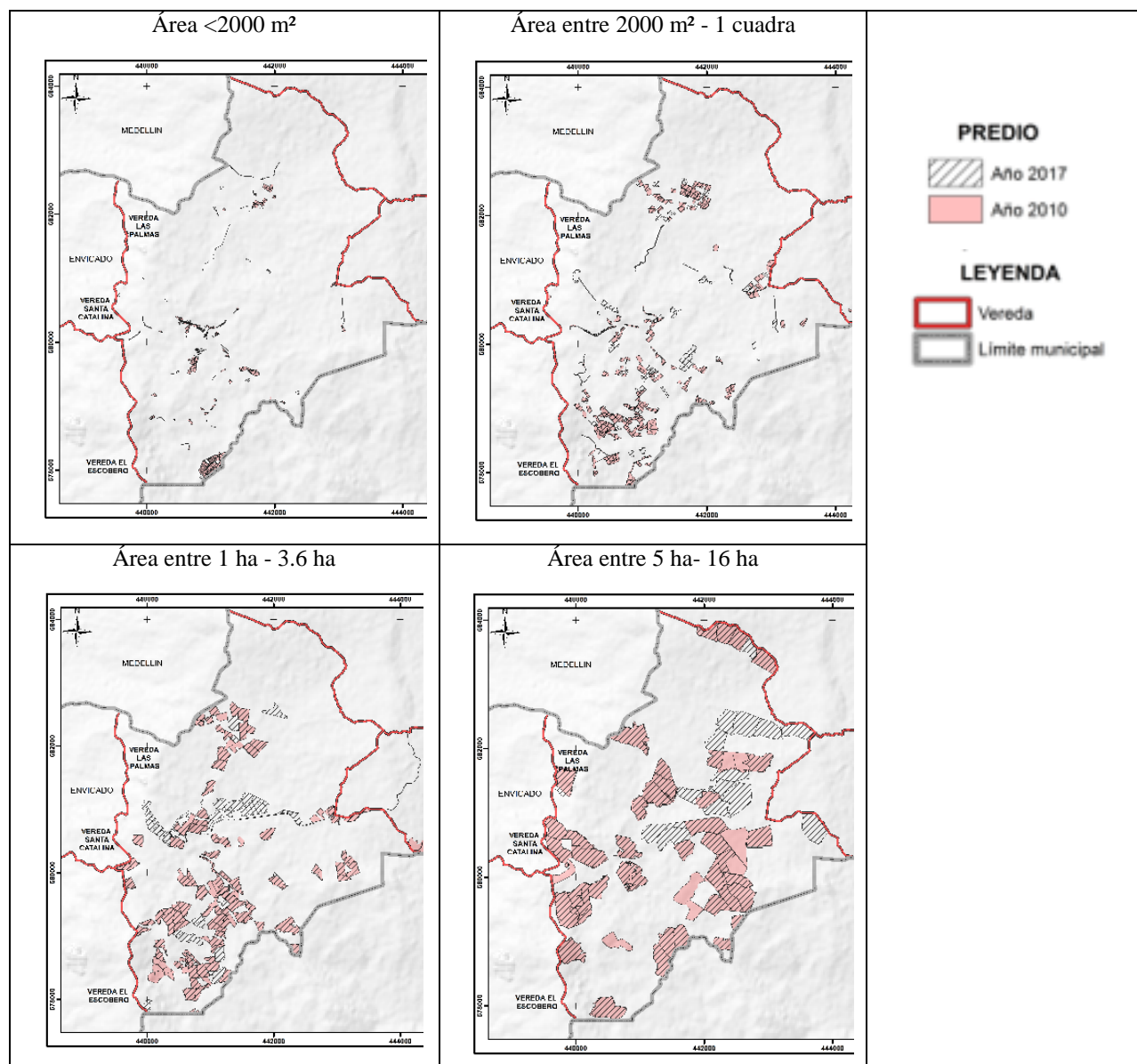


Figura 38. Distribución de predios en vereda Las Palmas entre 2010 y 2017. Fuente: Elaboración propia.

## 6.8 Validación de resultados

La Secretaría de Medio Ambiente y Desarrollo Agropecuario del municipio realizó en el 2013 la actualización del mapa de coberturas vegetales del municipio de Envigado para 3 años (1993, 2006 y 2013). Este trabajo se empleó como soporte de información y de validación para los resultados obtenidos en el desarrollo de este proyecto de investigación, así como para revisar

la forma en que la Alcaldía, por medio de su Secretaria, ha identificado, clasificado y mapeado los cambios ocurridos sobre su jurisdicción.

En dicho trabajo se empleó la metodología de *Corine Land Cover* tomada de la “leyenda nacional de coberturas de la tierra” adaptada para Colombia por el Ideam (Figura 4). Para validar la información, se homologaron las diferentes coberturas observadas en dicho estudio con las coberturas observadas en la presente investigación, tal como se indica a continuación en la Tabla 32:

Tabla 32

*Homologación de coberturas*

Coberturas- Secretaria de Medio Ambiente	Coberturas - Ortofotografías					
	Bosque	Cultivo	Mosaico	Pasto	Urbano	Suelo desnudo
Bosque						
Plantación de coníferas						
Plantación de latifoliadas						
Plantación forestal	x					
Vegetación secundaria alta						
Vegetación secundaria baja						
Cultivos confinados						
Cultivos permanentes arbustivos						
Cultivos transitorios		x				
Mosaico de cultivos						
Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales						
Mosaico de pastos con espacios naturales			x			
Mosaico de pastos y cultivos						
Pastos arbolados						
Pastos enmalezados					x	
Pastos limpios						
Tejido urbano discontinuo					x	
Zonas industriales o comerciales						
Tierras desnudas y degradadas						x

Fuente: Elaboración propia

Las coberturas de mosaicos, por su complejidad en la estructura y distribución de áreas para los diferentes aspectos que describen su composición (área de pastos, cultivos y espacios naturales), se unificaron en una sola categoría global que enmarcara el espíritu de esta y con la cual pudiéramos obtener áreas y tendencias.



En las siguientes figuras (Figura 39, Figura 40 y Figura 41) se describen las diferentes coberturas y su distribución espacial con relación al área de estudio. Las convenciones empleadas son las siguientes: TUC: Tejido Urbano Continuo, Pl: Pasto limpio, Pa: Pasto arbolado, Cuc: Cultivos confinados, Mc: Mosaico de Cultivos, Mpc: Mosaico de pastos y cultivos, B: Bosque, Plt: Plantación forestal, Vsa: Vegetación secundaria alta, Vsb: Vegetación secundaria baja, y Tdd: Tierras desnudas y degradadas.

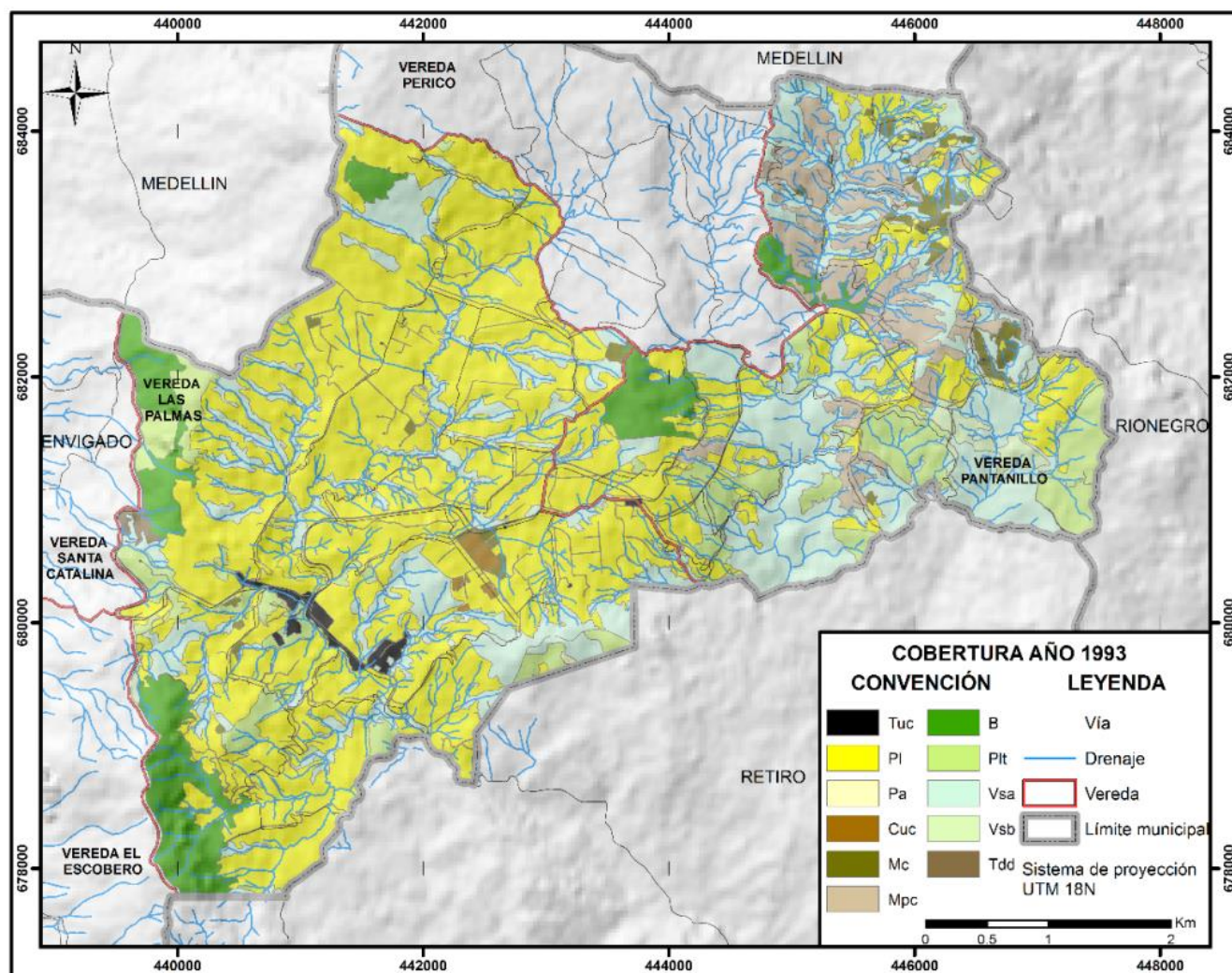


Figura 39. Cobertura año 1993, Secretaria de Medio Ambiente Envigado. Fuente: Elaboración propia a partir de Secretaria de Medio ambiente Envigado, 2013

La principal cobertura encontrada son los pastos (siendo dominante el pasto limpio). Esta cobertura está fuertemente presente en la vereda Las Palmas y se ubica de forma norte-sur, paralelo a la divisoria de aguas entre el valle de San Nicolás y el Valle de Aburrá. Los bosques están muy restringidos geográficamente y están ubicados en la margen izquierda de la vía Medellín – Las Palmas, en el límite entre las veredas Las Palmas y El Escobero, y en el límite entre las veredas Las Palmas y Perico. Las áreas contiguas a los drenajes poseen una cobertura de vegetación secundaria, la cual en algunos sectores es alta y en otros es baja. Como se observa, las tierras desnudas están ubicadas mayoritariamente en la vereda Pantanillo en el sector norte. Como se identificó en la interpretación realizada para las ortofotografías, este sector es ampliamente empleado para los diferentes cultivos reportados para la vereda.

El área empleada del tejido urbano es muy pequeña y está localizada en el alto de Las Palmas, en el sector de Indiana, y está fuertemente restringida a la vía. Como se verá más adelante, este es el sector de nucleación tomado para el desarrollo inmobiliario

En una segunda imagen, correspondiente al año 2006, se observa que las áreas de pastos, mosaicos, tierras desnudas y bosques en general a pesar de su disminución, presentan la misma tendencia en su distribución espacial. En este delta de tiempo de 13 años, la cobertura de tejido urbano ha tenido un crecimiento muy importante, ya que se puede observar como esta cobertura ha crecido en sectores no contiguos a la vía. Es de resaltar que los cuerpos de agua, que están siendo rodeados por el tejido urbano en la zona norte en límites con el municipio, han tenido una mejora ecológica dado que han pasado de vegetación secundaria a bosque.



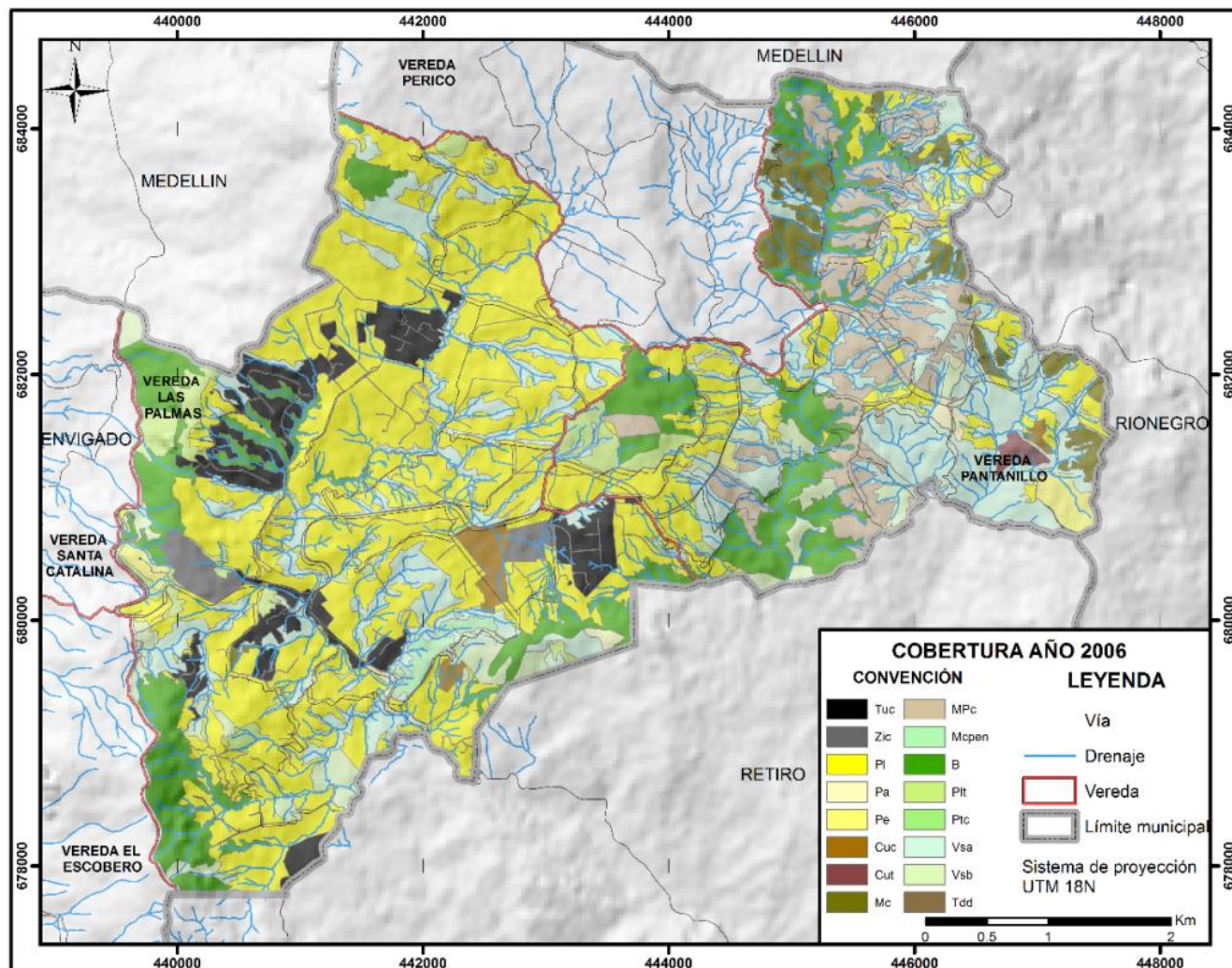


Figura 40. Cobertura año 2006, Secretaria de Medio Ambiente Envigado. Fuente: Elaboración propia a partir de Secretaria de Medio ambiente Envigado, 2013

En una tercera imagen, correspondiente al año 2013, se observa que las tendencias descritas anteriormente para el año 2006 continúan y se afirman, siendo el tejido urbano y las zonas comerciales las de mayor crecimiento, con una disminución de los pastizales. Localmente se observan zonas con una pérdida de bosque por vegetación secundaria y zonas con pérdida de bosque por cultivo (ubicadas entre el límite de la vereda Pantanillo y el municipio de El Retiro).

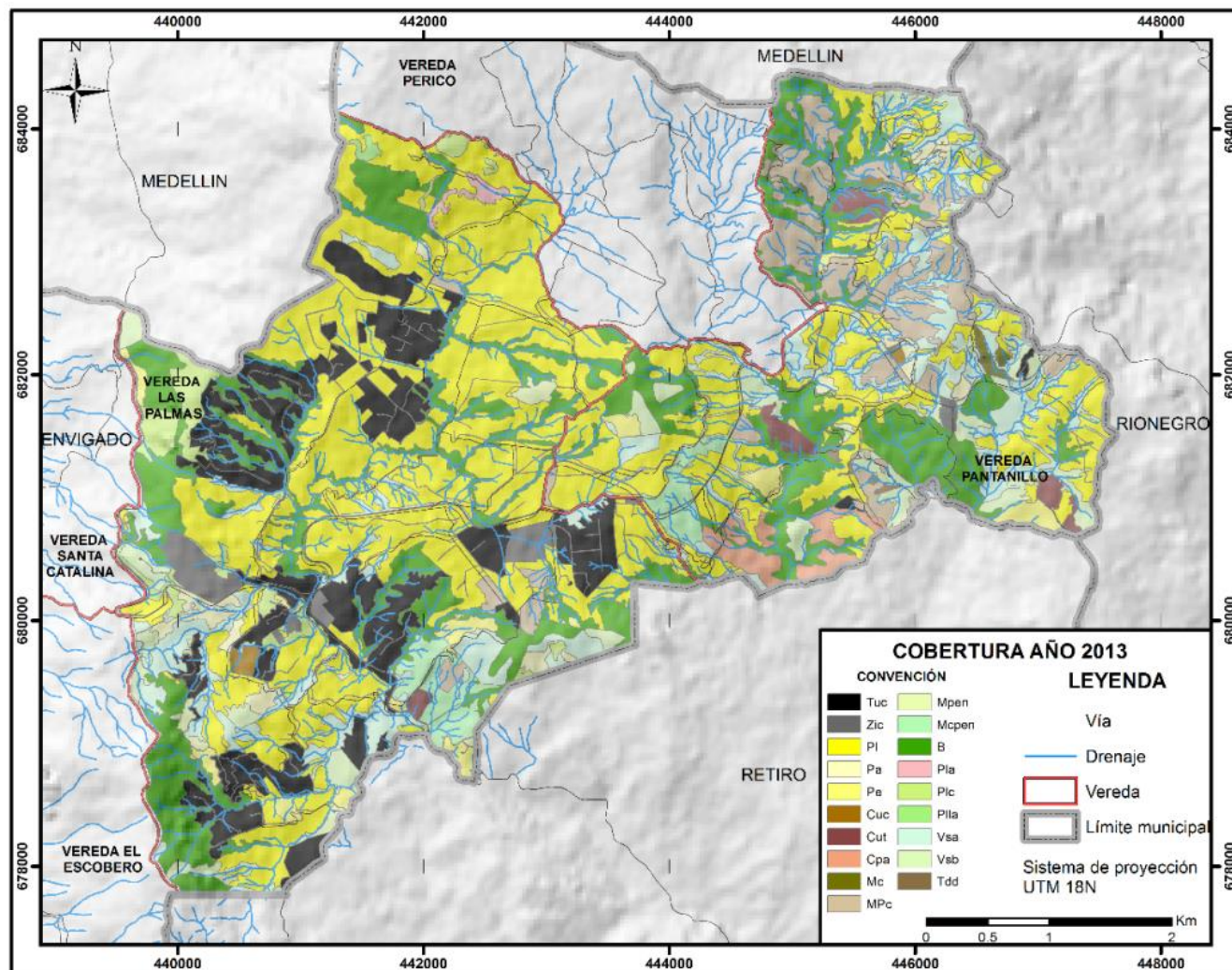
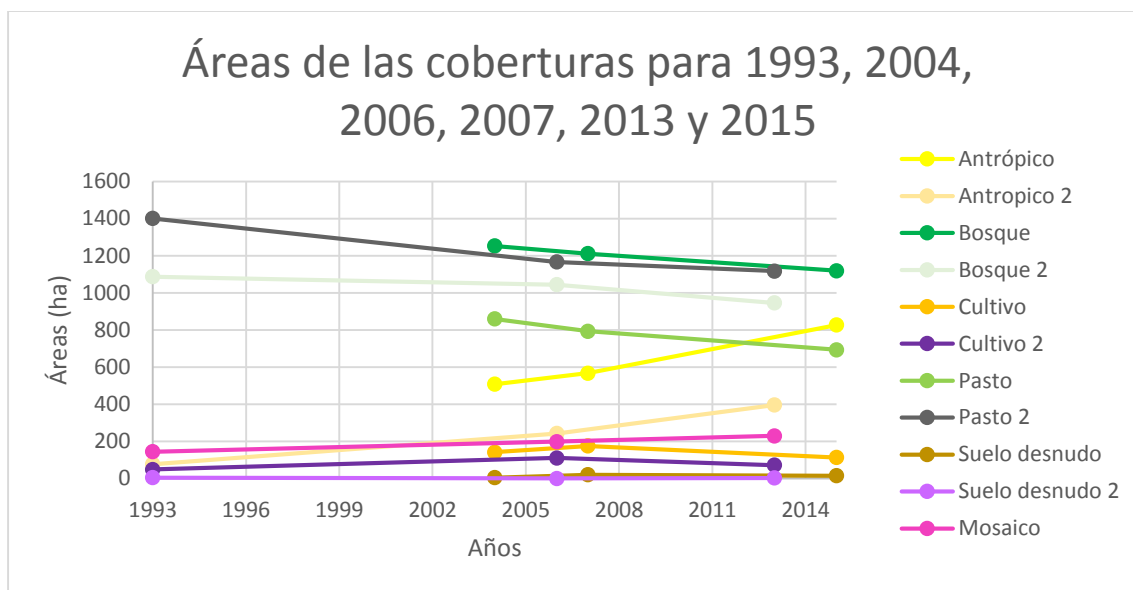


Figura 41. Cobertura año 2013, Secretaria de Medio Ambiente Envigado. Fuente: Elaboración propia a partir de Secretaria de Medio ambiente Envigado, 2013

En la Figura 42 se presenta la variación del área para las diferentes coberturas en los años de análisis, presentada por la Secretaria de Medio Ambiente (coberturas con el número 2), y en los años de análisis de las ortofotografías estudiadas en la presente investigación.



\*La convención con el numero 2 corresponde al dato de la Secretaria de Medio Ambiente.

Figura 42. Áreas de las coberturas según estudio de Secretaria de medio ambiente y según la investigación en curso.

Fuente: Elaboración propia

Las tendencias presentadas por las dos fuentes de información son similares, con lo que se tiene una validación a la interpretación realizada y a los datos obtenidos. Como se ha descrito anteriormente, las coberturas de bosque, pasto y cultivo presentan pérdidas claras de área en pos del crecimiento del área destinada para la cobertura urbana y las actividades antrópicas.

A continuación, se hace una comparación entre los datos obtenidos en áreas (ha) de las coberturas de bosque y antrópico en diferentes intervalos temporales, teniendo en cuenta que son las coberturas más relevantes en términos de transformación del entorno y ya que se presentan como capas comunes en los diferentes métodos implementados en este trabajo, así como de los tomados de información secundaria. Esta comparación se hace entre: la interpretación de imágenes Landsat y de ortofotografías, el cálculo de los índices BU y NDVI obtenidos del actual estudio y los datos calculados en su estudio del 2013 por la Secretaria del Medio Ambiente. Para realizar los comparativos pertinentes entre estas coberturas se establecieron las tendencias lineales de los datos al graficar área (ha) contra tiempo (años). En la Tabla 33 se presentan las ecuaciones de las diferentes líneas de tendencias obtenidas para estas coberturas, las cuales



posteriormente serán empleadas para la estimación de los valores en el rango de tiempo del estudio.

Tabla 33

*Ecuación de línea de tendencia para las coberturas bosque y antrópico*

<b>Cobertura</b>	<b>Ecuación Línea de tendencia</b>
Landsat_Bosque	$y = -1,4372x + 4131,8$
NDVI	$y = -25,187x + 51339$
Ortofoto_Bosque	$y = -12,018x + 25334$
SMA_Bosque	$y = -6,5907x + 14234$
Landsat_Antrópico	$y = 1,2224x - 2405,5$
BU	$y = -0,7788x + 1645,2$
Ortofoto_Antrópico	$y = 29,691x - 59005$
SMA_Antrópico	$y = 15,55x - 30924$

Fuente: Elaboración propia

Como se observa en la Figura 43, la forma de las curvas es ascendente con excepción de la línea para el índice de BU, siendo la clasificación de la ortofoto la que presenta la rata más acelerada en la ganancia de esta cobertura. Sin embargo, la tendencia observada por los datos elaborados por la Secretaria de Medio Ambiente es similar a la desarrollada por la fotointerpretación del presente estudio, siendo una posible causa de la diferencia el no haber podido homogenizar los criterios iniciales para dichas interpretaciones. Al revisar las tendencias del índice BU y la información obtenida del sensor Landsat, se observa que ambas muestran cambios con ratas de aceleración claramente menores o, en el caso del BU, un índice levemente decreciente con una forma similar a una asíntota.

La clara diferencia entre los cambios obtenidos para las áreas reportadas para los métodos de interpretación de las ortofotos y lo reportado por la SMA contrasta con lo obtenido a través de la clasificación supervisada de las imágenes Landsat. Esto se debe a que en la clasificación supervisada las semillas solo toman el conjunto de píxeles descritos y no el contexto del área aledaña a la construcción, lo que sí ocurre en una interpretación manual como, por ejemplo, los jardines, los separadores de calle o pastos que en su conjunto forman un área antrópica.

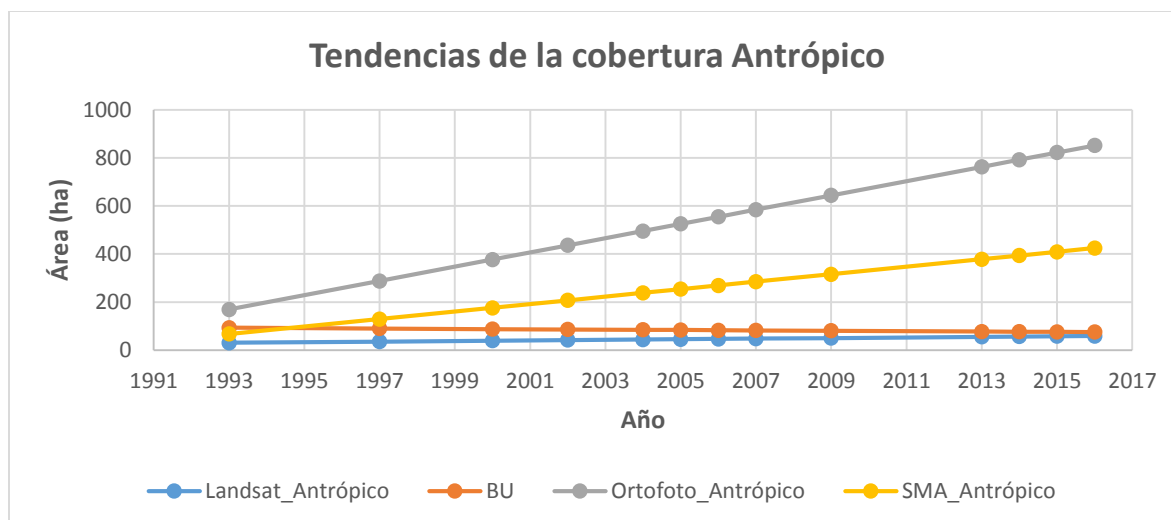


Figura 43. Línea de tendencia de la cobertura antrópico. Fuente: Elaboración propia

La Figura 44, que ilustra la información de la cobertura de bosque, muestra un comportamiento opuesto al crecimiento observado y descrito para la cobertura antrópica, ya que se evidencia una clara y continua pérdida de área en esta cobertura a través del tiempo. Esto es un indicador de manera indirecta de la pérdida en la calidad de los ecosistemas.

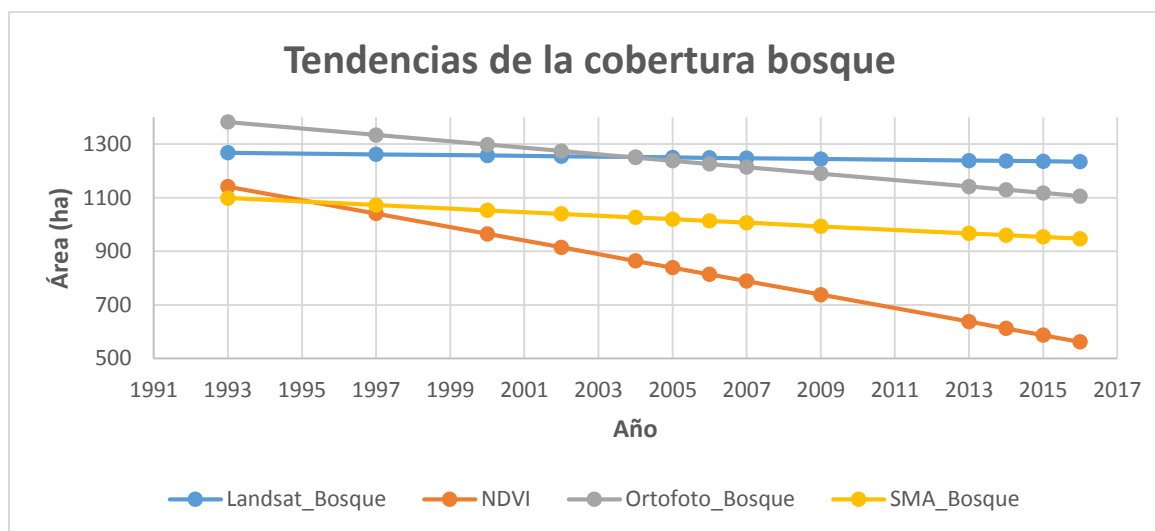


Figura 44. Línea de tendencia de la cobertura antrópico. Fuente: Elaboración propia.

## 7 Discusión

La organización del espacio y el aprovechamiento de recursos son elementos primordiales en el ordenamiento del territorio, así el desarrollo que se genera dentro del territorio está íntimamente ligado a estas directrices y a la cultura presente a nivel local y en las zonas aledañas. Los sensores remotos constituyen herramientas que brindan información sobre el territorio a diferentes escalas espaciales y temporales, por lo tanto, pueden ser un apoyo para la toma de decisiones y la planeación. En este estudio el empleo de imágenes satelitales Landsat y ortofotografías permitieron obtener mapas de cobertura de tierra para cada año analizado para las veredas Las Palmas y Pantanillo del municipio de Envigado entre el 1997 y el 2016, las cuales se analizaron a la luz de los Planes de Ordenamiento Territorial. Hasta el momento, Envigado ha propuesto dos, realizados en los años 2001 y 2011.

En el POT del 2001 se estipula que la zona del presente estudio corresponde a suelo rural con los siguientes usos de suelo: agrícola-residencial, zona productora- protectora-forestal, zona protectora forestal y zona comercial y/o servicios. En este plan, la zona agrícola-residencial se define como toda el área rural del municipio de Envigado, exceptuando las zonas de protección y la productora protectora forestal (Municipio Envigado, 2011), y en esta se permitían como actividades complementarias la producción agropecuaria, el aprovechamiento forestal, agrícola y silvopastoril. El POT del 2001 establece las zonas productoras – protectora forestal se encontraban en la vereda Las Palmas, entre la carretera Envigado Alto de las palmas y la línea de la quebrada El Atravesado, entre las cotas 26000 msnm y 2700 msnm, en límites con el municipio de Medellín y en zonas por encima de la cota 2600 msnm. Como suelo de protección se tenía la vía alto de las Palmas-Aeropuerto por tener interés paisajístico y de servicios y la vía Las Palmas – El Retiro, por ser un corredor de interés turístico.

Con respecto a la vocación del uso del suelo, en este POT se plantea que la actividad agropecuaria y los aprovechamientos forestales son fuente de sustento para algunos habitantes del sector rural, y se enunciaba que por esos días el área rural del municipio albergaba parcelaciones de tipo recreativo con estratos socioeconómicos altos. A pesar de esto, el área seguía conservando el carácter de rural en las veredas Perico y Pantanillo, donde se destacaba la típica vivienda campesina, heredada de los antepasados y que paulatinamente se subdividía hasta

que cada uno de los habitantes tuviera su propia porción de terreno. Se reconoce también que hay cultivos de mora, papa, flores, aromáticas, etc. Con respecto a la vereda Las Palmas, se le muestra como la zona más concentrada del área rural de Envigado, sobre todo en el sector aledaño a la inspección de policía y también a las zonas altas de las Veredas Perico y Pantanillo.

En este POT se contemplaban los condominios campesinos, “para evitar un desplazamiento total de los campesinos que quedan en nuestras zonas rurales y que sus familias puedan acceder a una vivienda digna, se permitirá la aprobación de condominios campesinos, velando siempre por la conservación del medio ambiente”. (Alcaldía de Envigado, 2001, p.170). Para acceder a este beneficio había que cumplir con unos requisitos como: un índice máximo de ocupación del 20% incluyendo viviendas, vías y construcciones complementarias, aplicado sobre el área neta del lote, que en ningún caso el área mínima por vivienda y lote debía ser inferior a los 60 m<sup>2</sup> y su altura no podía sobrepasar los dos niveles conservando siempre una tipología de vivienda unifamiliar, la densidad sería máxima de 8 viviendas por hectárea, y esto solo era aplicable a los predios que subsistan netamente de producción agropecuaria.

Esto indica que desde el 2001 ya se consideraba un cambio en el uso asignado al suelo, diferente al estrictamente rural y agropecuario, y se preveía el giro que se quería dar al municipio con respecto al tipo de población que lo ocupaba, pues aunque las zonas rurales especialmente las veredas Pantanillo, Pericos y Las Palmas tienen vocación de uso de suelo agrícola, en ese entonces se desarrollaban actividades productivas y sus habitantes eran en un alto porcentaje campesinos ya se daba esa condición de uso del suelo con fines habitacionales recreativos, que además lo avalaba el POT.

El POT del 2011, que rige actualmente, cambia un poco con respecto al planteado en el año 2001. Los usos del suelo son:

-Corredores viales suburbanos, conformados por las vías Medellín –Alto de las Palmas, Vía alto de las Palmas – Aeropuerto, Vía alto de Las Palmas – El Retiro, Vía, Envigado, - Alto de Las Palmas.

-Suelo suburbano de Pantanillo y Las Palmas y los corredores viales, los cuales corresponden a áreas dentro del suelo rural en las que se mezclan los usos del suelo y las formas de vida del campo y la ciudad. En el POT está planteado que, según decreto 3600 de 2007, se determina

como umbral máximo de suburbanización el 31,76% equivalente a 2.036, 16 ha resultantes de sumar el suelo suburbano y los corredores viales, con respecto al suelo rural que es 6410,72 ha. Este umbral máximo de suburbanización se define al carecer de desarrollo, por la baja ocupación y baja densidad el suelo suburbano, y por las normas de conservación y protección de la estructura ecológica y del medio ambiente en general.

-Suelo para parcelación de vivienda campestre en las Palmas

-Centro poblado Las Palmas. Con respecto a este y a los otros centros poblados, se les permite desarrollar una vivienda en los lotes existentes que no posean construcción y con matrícula inmobiliaria.

En este POT se habla de criterios para definir densidades máximas urbanas, para lo que se tiene una normativa bien establecida, así: 3.8h/V, 4 h/V en Pantanillo, y 20 h/v en el centro poblado Las Palmas. La unidad mínima de actuación de Envigado es 5 ha, donde la unidad mínima de actuación es la superficie mínima de terreno definida en el componente rural del Plan de Ordenamiento Territorial y que puede incluir una o varias unidades prediales para la ejecución de actuaciones urbanísticas de parcelación y edificación de inmuebles, teniendo en cuenta los usos permitidos en el suelo rural suburbano.

En centros poblados rurales no se permite parcelación, la subdivisión, ni la construcción de vivienda nueva. Se exceptúa de esta prohibición al centro poblado rural de Las Palmas, donde se tenía presupuestado construir 60 viviendas incluidas en el Plan de Desarrollo “Avancemos con toda seguridad”, aprobado mediante el Acuerdo municipal 025 de 2008. Lo anterior es coherente con lo que se había propuesto en el POT del 2001.

En las áreas de parcelación para vivienda campestre se permite el desarrollo de parcelación para vivienda campestre. Además, los desarrollos por parcelación o construcción que se ejecuten en el suelo rural deben quedar vinculados al sistema vial público.

Como se decretó en el POT del año 2001 para el municipio, la densidad habitacional para la mayor parte del área de estudio comprendía un intervalo de 1 a 1.56 viviendas por hectárea, con lo cual se tenía un número potencial de viviendas de 3986 aproximadamente. Ya en el POT del 2011, vigente actualmente, las densidades aumentan considerablemente, ubicándose en el intervalo 1/38 hasta 20 viviendas por hectárea y con un grueso de 3.8 viviendas por hectáreas,



dando un potencial de 25.250 viviendas. Este cambio en el modelo de densidad habitacional para el suelo da un crecimiento de 633%, aproximadamente, en el número de viviendas posibles de construir, generando una fuerte presión para la urbanización del territorio.

El POT del 2001, en términos generales, muestra una visión rural de las veredas de estudio con áreas importantes de protección y reconociendo el sector del alto de Las Palmas como un polo suburbano, presente en el territorio claramente limitado en extensión y locación. Las zonas de protección están íntimamente ligadas a la preservación de los recursos hídricos y a los escarpes presentes en la zona oriental (divisoria de aguas del Valle de Aburra), y en los límites con el municipio de Medellín. Todas estas áreas de protección presentan grandes beneficios en servicios ecosistémicos para la comunidad, prestando una barrera a la presión urbanística ejercida en el Valle de Aburra y de San Nicolás. El POT del 2011 cambia radicalmente la forma de ver y entender el territorio en la zona de estudio, presentado una modificación del uso rural mayoritario, establecido en POT anterior, a una visión suburbana y con una fuerte vocación de desarrollo de viviendas bajo la subcategoría de “parcelación de vivienda campestre”. Asociado a este importante cambio, se ha creado la categoría de corredor suburbano el cual acelera el desarrollo urbanístico del área de estudio. Las áreas de protección han disminuido considerablemente y se han agrupado en la categoría de Área de espacial importancia ecosistémica, presente en la zona de ladera media a alta en la zona oriental (divisoria de aguas del Valle de Aburra) y en los límites con el municipio de Medellín.

El cambio en la mirada del territorio ha permitido el fuerte desarrollo constructor presente en el área de estudio, presentado transformaciones tangibles y observando un número importante de nuevos proyectos planeados para construcción.

Como se puede observar en la Figura 45, en la que se sobreponen los usos del suelo propuestos en el 2001 y las coberturas identificadas en este trabajo para el año 2004, el uso del suelo aprobado en el año 2001 para la zona de interés es destinado en su mayor parte a un suelo rural. Sin embargo, ambas veredas se proponen, en la actualidad, usos del suelo diferentes, siendo la vereda Pantanillo más rural, con una marcada presencia de cultivos permanentes y una presencia de vegetación tipo bosque muy fuerte. La vereda Las Palmas, por el contrario, evidencia una agrupación de usos bien definidos así: hacia el sector occidental se presenta una masa de bosque importante que cubra y protege la ladera, sectores con fuerte desarrollo

antrópico en la parte medial asociados al desarrollo de infraestructura en el alto de Las Palmas y en sector de Indiana, y una fuerte presencia de pastizales en la parte central y oriental de la vereda.

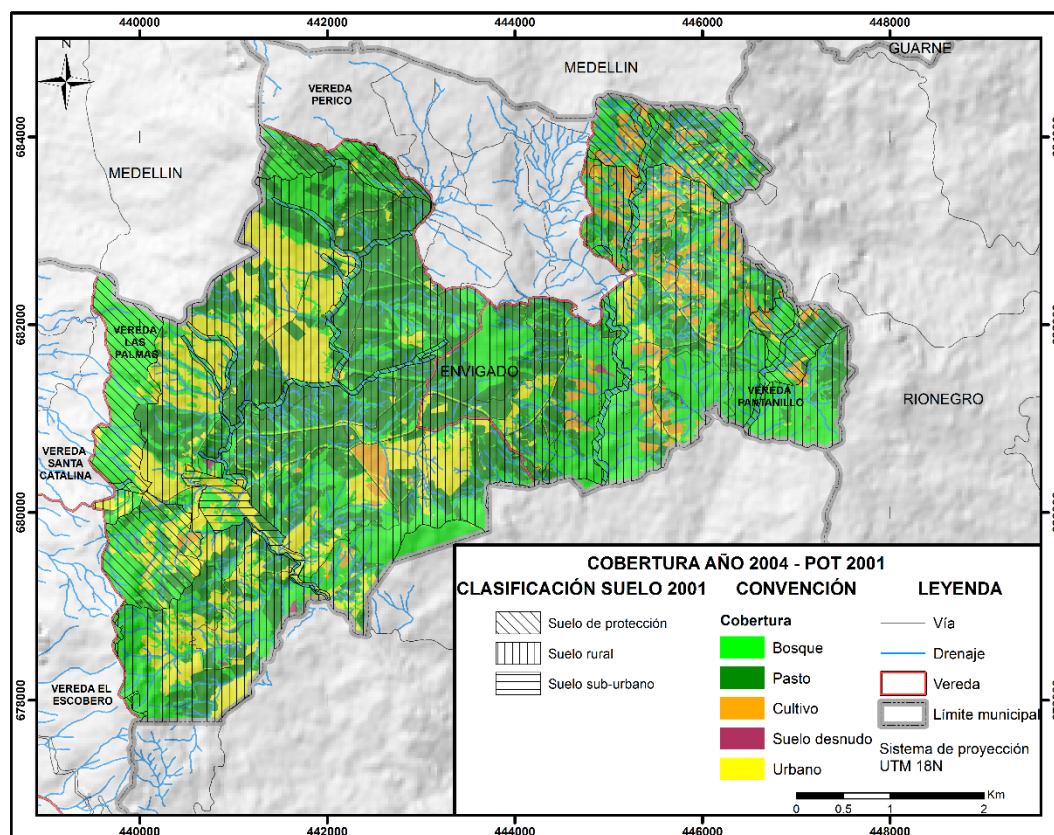


Figura 45. Comparación clasificación del suelo POT 2001 y coberturas Ortofotografía 2004. Fuente: Elaboración propia

Al comparar la propuesta para clasificación del suelo en el POT del 2001 con las coberturas interpretadas en el presente estudio, se puede inferir que el planteamiento de ocupación del suelo propuesto por el municipio es acorde con las coberturas encontradas y no se está infringiendo ninguna normativa, como se había pensado al inicio del planteamiento de este proyecto. La zona correspondiente a suelo de protección, que se intercepta con áreas antrópicas, cumple con su condición de protección pues, analizando las imágenes de años anteriores a 2001, se aprecia que las actividades agrícolas desarrolladas en la cobertura pasto ya existían antes del

2001. Se observa, además, como en suelos suburbanos hay presencia de actividad urbana-antrópica, lo cual es coherente con los lineamientos del POT para áreas suburbanas.

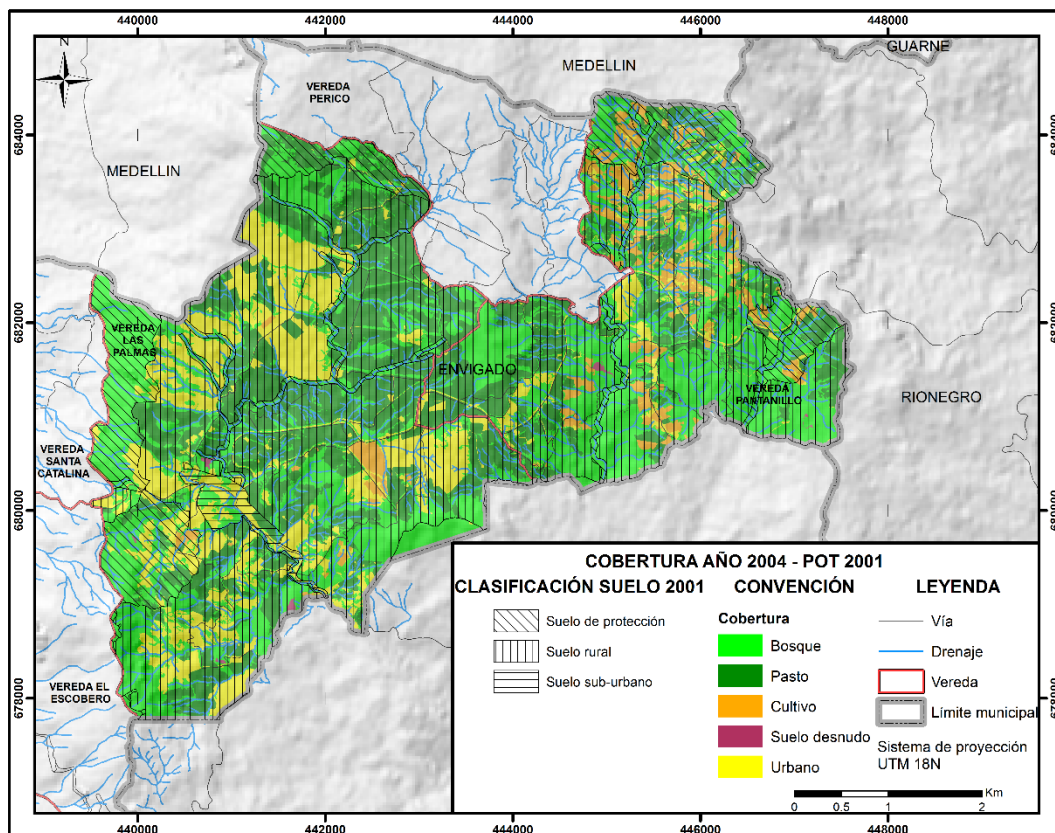


Figura 46. Comparación clasificación del suelo POT 2011 y coberturas Ortofotografía 2015. Fuente: Elaboración propia

Como se puede observar en la Figura 46, en la que se sobrepone el uso del suelo aprobado en el año 2011 y la interpretación de coberturas para la ortofotografía del 2015, el uso del suelo ha cambiado considerablemente con respecto al acuerdo del anterior POT. En esta nueva concepción del territorio se ha cambiado el uso del suelo en gran parte de rural a parcelación de vivienda campestre. La vereda Pantanillo ha mostrado una actividad proclive al agropecuario, con marcada presencia de cultivos, pastizales y conservación de bosques en diferentes estados. Sin embargo, se puede apreciar el crecimiento marcado de capa denominada antrópica, siendo más acentuado en el eje de corredor suburbano. La vereda Las Palmas ha

mostrado un crecimiento robusto en la capa antrópica. Esta está localizada en gran parte en la zona de Indiana y sus alrededores, con un crecimiento radial

Al revisar los resultados obtenidos con las imágenes satelitales, se observa que en ambas veredas el mayor cambio se da de bosque a pasto (con rangos entre 0,44% y 13,67%), seguido de pasto a bosque (con rangos entre 2,63% y 8,59%) y de suelo a pasto (con rangos entre 0,27% y 5,89%). Los cambios a cobertura antrópica presentan valores menores a 1,24%, con un promedio de 0,34%. Lo que puede indicar un aumento en la actividad agropecuaria o aumento en lugares de recreación para el intervalo analizado. Por otro lado, tras analizar los índices NDVI se observa una pérdida continua de la cobertura boscosa durante los años estudiados del 43.84% o 466.63 ha netas, y el índice BU estimó un aumento del 203.76% en el área construida pasando de 40.46 ha a 82.45ha, con crecimiento del 10.53% interanual, como habría de esperarse teniendo en cuenta la normativa propuesta en el POT del 2011.

Las veredas Pantanillo y Las Palmas corresponden a territorios rurales del municipio de Envigado, el cual, a lo largo de la historia, ha pretendido tener independencia con respecto al área metropolitana. No obstante, en su POT del 2001 se plantea que es subcentro articulado con un alto grado de dependencia con respecto a la conformación de la centralidad de la región metropolitana, generando así exclusividad de dominio, dependencia, modificaciones en su capacidad o métodos de gestión local y fenómenos generados por la alta aglomeración, dinámica de reacomodamiento expansivo de vivienda, comercio, servicios, apropiación de recursos y superposición de culturas.

Este municipio, al igual que los aledaños como Rionegro y El Retiro, recibe una fuerte incidencia del área metropolitana, sobretodo de Medellín, y las dinámicas locales de estos territorios de borde necesariamente se insertan y articulan en este entramado regional. No obstante, cada uno de ellos tiene una identidad conferida por sus relieves, sus servicios ecosistémicos, las características de la población, las actividades productivas, sus infraestructuras y legislaciones, entre otros.

Particularmente con respecto al uso del suelo y actividades, Envigado se ha caracterizado por tener una “baja vocación agrícola, comercial e industrial, la cual, aunque no representa una numerosa presencia, su fuerza y capital son de mayor peso” (Alcaldía de Envigado, 2001, p.62). La vocación agrícola es más significativa en las veredas Las Palmas y Pantanillo, sobretodo en la

segunda, pues parte de la población vive de actividades productivas y se cultiva mora, papa, plátano, café, aromáticas, flores, tomate de árbol, cultivo de pan coger y también hay algunas explotaciones ganaderas, piscícolas y avícolas.

Los cambios más relevantes de este territorio consisten en que estas actividades económicas agrícolas han venido siendo desplazadas por actividades de urbanización (Alcaldía de Envigado, 2001), con un aumento paulatino en fincas de recreo, pues el municipio ofrece una buena calidad de vida. Este cambio se da pese a que los suelos de ambas veredas, desde tiempos atrás, hayan sido empleados y destinados para uso residencial campestre, parcelaciones de tipo recreativo con alta tendencia a ser de vivienda permanente. Este continuo cambio es definido en el mismo POT como una “nueva ruralidad”, en la que convergen actividades e infraestructuras propias de zonas rurales con aquellas asociadas a fines recreativos y habitacionales, extraídas de la ciudad.

Esta fuerte urbanización ha generado grandes cambios en las dinámicas sociales, culturales y naturales en muy poco tiempo, lo cual ha impuesto una fuerte presión al recurso finito que constituye el suelo propio y el de los municipios circundantes, haciendo de estos contactos territorios dinámicos fuertemente influenciados entre sí. Estos pueden ser definidos como un borde de transición para la conurbación, el cual se define como “la articulación de dos o más ciudades con procesos de conurbación en curso, que son objeto de presiones para el desarrollo constructivo. La actividad edificatoria es evidente y es ofertada en los diversos municipios que forman el borde” (Suárez, 2016, p.68).

Al analizar los diferentes usos del suelo asignados por los municipios colindantes con Envigado, excluyendo a Medellín, se puede concluir que el borde presente en el área de estudio es de este tipo. La mayor variable para este borde es el mercado inmobiliario local, el cual está altamente activo desarrollando nuevos proyectos urbanísticos y cambiando rotundamente el paisaje del área de estudio.

Limite Medellín – Envigado: el uso actual del suelo propuesto en el POT del municipio de Envigado en el año 2011 contrasta notoriamente con lo propuesto en el POT del municipio de Medellín (Alcaldía de Medellín, 2014) en las áreas colindantes del estudio, generando con ello un marcado contraste entre ambos municipios. Como se describe en el POT de Medellín, la destinación del uso del suelo en el corregimiento Santa Elena que limita con la vereda Palmas

está en uso del tipo agrícola, agropecuario y forestal protector, el cual contrasta marcadamente con el dado en el municipio de Envigado, este es en su mayor parte para parcelación de vivienda campestre, con algunas excepciones como las zonas de preservación hídrica y la zona de conservación de 2700 msnm. Con esta marcada diferencia se genera una serie de fuerzas opuestas entre sí con tendencias diferentes en ambos territorios, una de preservación-uso sostenible y otra de desarrollo urbanístico.

Limite Rionegro – Envigado: el límite entre ambos municipios es el que menos diferencias posee entre sus vecinos colindantes. Según el POT del Rionegro (Alcaldía de Rionegro, 2011), el municipio en su límite posee una clasificación en el uso del suelo con las siguientes subdivisiones: preservación, restauración y uso sostenible, los cuales son similares a los propuestos por el municipio de Envigado: suelos suburbanos, áreas de conservación y protección ambiental, y corredores suburbanos. Estas categorías guardan coherencia entre sí.

Limite El Retiro – Envigado: tras revisar el PBOT de El Retiro (Alcaldía de El Retiro, 2013), se observa que en el límite entre ambos municipios conviven zonas con usos similares, dando una compatibilidad y continuidad en el uso del suelo con una armonía entre ambos, disminuyendo entre sí su competencia y dando complementariedad a ambos modelos de desarrollo. Sin embargo, se presentan también disimilitudes entre el uso de conservación y protección ambiental asignado a la vereda Pantanillo con la zona de parcelaciones del Retiro, lo que plantea una zona de borde entre ambos municipios.

Estos usos propuestos se deberán estudiar más a fondo en un ámbito regional, el cual se escapa al alcance de esta tesis y debe abarcar a los municipios del valle metropolitano de Aburra y sus vecinos respectivos, con el fin de armonizar y llegar a consensos que eviten la generación de presiones innecesarias para el uso del suelo en las fronteras y con ello armonizar y potenciar los recursos del suelo.

Como se describe en los objetivos, en las estrategias y en los artículos descritos en el POT, estos no se aplican 100% de acorde a lo observado en las veredas. El fuerte cambio que se dio en el cambio del POT del 2001 al del 2011 en la zona de estudio, con el permiso en el uso del suelo rural a parcelación de vivienda campestre y la generación de los corredores viales (entrando en la categoría de suelos suburbanos), presenta una nueva forma del uso del suelo y la disponibilidad de la tierra. Muchos de los artículos de los POT de Envigado, hacen un fuerte énfasis en la

protección del medio ambiente, los servicios ecosistémicos presentes en la zona, la delimitación y contención del crecimiento del área urbana, la democratización de las vías de acceso, el empleo del sistema de transporte público, pero con lo aplicado y observado en las imágenes satelitales y ortofotografías se observa un detrimento de estos recursos naturales no coherente con los artículos. Esto se apoya en la disminución de los bosques, el crecimiento de la frontera urbana, la dependencia de una sola vía principal de acceso, la no generación de equipamiento urbano fuera de los desarrollos inmobiliarios para los moradores etc.

## 8 Conclusiones

Como se obtuvo de los análisis y de la estimación de las tasas de cambio en las coberturas a partir de la clasificación supervisada de imágenes Landsat y la interpretación de las ortofotografías, el bosque es la cobertura que más área ha perdido, pérdida que se ha asociado con el pasto en pos del crecimiento del área urbana y del suelo desnudo. Estas coberturas están íntimamente ligadas por los métodos constructivos o, en algunos casos, el cambio del suelo entre pastos limpios a suelos desnudos en preparación para cultivos transitorios. Los cambios más acentuados ocurren en el sector del Alto de Palmas con su cambio de bosque y pastizales a áreas antrópicas, y en la vereda Pantanillo con sus cambios entre suelos desnudos, pastizales y, en menor medida, hacia antrópico.

La observación anterior es apoyada por el empleo de índices BU y NDVI, pues, según el índice NDVI para el intervalo estudiado la pérdida en la cobertura bosque fue del 43.84% o 466.63 ha. Esta clara disminución es consistente con una pérdida acelerada en el periodo 2013 – 2014, la cual se plantea como el resultado de la entrada en vigencia del POT de 2011 y del inicio de los diferentes proyectos de desarrollo inmobiliario. De manera paralela, se ve probado por el mayor aumento del área antrópica con una leve aceleración iniciada en el año 2013. El empleo de índices en el desarrollo de investigaciones se ha mostrado como gran ayuda y, en algunos casos, es la principal fuente de información para el análisis e interpretación de los datos obtenidos en las escenas estudiadas.

Los principales cambios en el aumento de predios de tamaños pequeños (menores a 3.6 ha) fue visto en el periodo de tiempo 2010-2011, es decir, en el periodo de transición del POT 2001-2010 al actual y con un salto también muy marcado en el periodo 2016-2017, visto en la vereda Las Palmas. Otro rasgo importante ha sido el crecimiento de los predios cuyos tamaños oscilan entre 5-16 ha, especialmente en la vereda Las Palmas, siendo estos valores importantes debido al desarrollo de proyectos de gran envergadura para lo cual se requiere la ampliación para su desarrollo.



Que en el POT de 2011 el uso del suelo para gran parte del área de las veredas esté destinado a “Parcelación de vivienda campestre” y a “vivienda” hace que las áreas de protección, como los territorios sobre la cota 2.700 y la reserva Nare, con usos del suelo “cobertura vegetal protectora”, “uso sostenible”, “preservación” y “restauración”, se verán en un futuro sometidas a la fuerte competencia dada por el establecimiento de vivienda campestre y turística. Con esto se puede afectar la calidad en los servicios ecosistémicos, se amenaza a la flora y la fauna en su biodiversidad y número de individuos. Este futuro desarrollo inmobiliario afecta además al corregimiento de Santa Elena, generando mayor presión a esta zona de borde.

El cambio de la densidad del uso del suelo del POT del 2001, con una densidad promedio del área de estudio de 1.56 VIV/ha, a la nueva densidad de 3.8 VIV/ha para el promedio del área de estudio en el POT del 2011, y el uso del suelo planificado como de parcelación de vivienda campestre en la mayor área de las veredas Las Palmas y Pantanillo, genera una fuerte presión para desarrollar complejos habitacionales. Este suelo entra a competir con el área de protección sobre la cota 2.700 msnm y con los límites del municipio de Medellín, volviendo compleja la relación dinámica existente en esta área.

La aplicación del POT del municipio de Envigado ha sido acorde a las normas y usos establecidos en sus reglamentaciones, tanto en el del año 2001 y del 2011. Como se observó en los primeros años después de la aprobación del POT del 2001, el desarrollo urbano se dio particularmente en el corredor vial de las Palmas, siguiendo las normativas con relación a la densidad aprobada para estas viviendas rurales, conservado el uso del suelo agrícola y rural. Esta dinámica cambia con la nueva entrada en vigencia del POT del año 2011, pues, los nuevos usos establecidos y las densidades habitacionales decretadas para la actividad edificadora generan un incremento en la construcción, y con esto cambios de uso de suelo de pasturas y pequeñas áreas de cobertura boscosa a un gran número de lotes dedicados a viviendas campestres y desarrollos urbanísticos de gran escala. Sin embargo, aunque se esté ejerciendo una fuerte presión a los suelos rurales, la aplicación de las normativas presentes en los años de estudio ha sido la adecuada y ha estado acorde a la reglamentación.

Las veredas Pantanillo y Las Palmas, que son territorios rurales, se corresponden a una zona de “borde de transición” en tanto son lugares dinámicos y en transformación asociados a la zona urbana de Envigado, a los municipios El Retiro y Rionegro, con un fuerte desarrollo

constructivo. Estas veredas, presentan vocación de uso del suelo agrícola, la cual poco a poco ha ido cambiando a habitacional, incluyendo estos usos de suelo con fines recreativos y habitacionales, con un aumento en la urbanización especialmente con fincas de recreo.

Durante el proceso de clasificación supervisada y en el proceso de la edición de las diferentes regiones de interés en las escenas analizadas se ha comprobado que, a mayor número de posibles coberturas o capas, la separabilidad espectral disminuye conllevando a un aumento significativo de los errores en los estadísticos de la matriz de confusión e índice Kappa, con lo cual se obtienen mapas temáticos de menor calidad. Es por ello que el reconocimiento previo de la zona fue de vital importancia, ayudando a tomar las mejores definiciones y coberturas finales para el análisis de los cambios en el territorio de estudio. Un ejemplo de esto son las capas de vegetación secundaria alta y baja, pasto enmalezado y cultivo, esta última cobertura descrita en las imágenes aéreas y no reportadas para las escenas satelitales, debido a que la separabilidad entre una posible capa de cultivo con la capa de pasto estuvo en un valor aproximado de 1.4, el cual visto a la luz de la separabilidad de capas es un valor no aceptable para la finalidad.

Para este tipo de análisis sigue siendo más precisa y confiable la interpretación realizada por un foto intérprete de ortofotografías y con un amplio conocimiento del sector, que la obtenida por estos métodos semi-automatizados en los que la separabilidad de las leyendas empleadas es dificultosa para el sistema, pues a pesar del procesamiento y clasificación supervisada hecha a las imágenes Landsat, los resultados obtenidos en ocasiones son valores disímiles, no concluyentes y contradictorios con las tendencias observadas en la información obtenida a partir de las ortofotografías, de las coberturas de análisis multitemporal entregadas por la Secretaria de Medio Ambiente del Municipio, y con lo evidenciado en la realidad que viven las veredas estudiadas.

En el contexto del proyecto de investigación, la teledetección brinda herramientas para observar el cambio acentuado y acelerado en ambas veredas. Como se puede observar y medir, la transformación de la vereda Las Palmas se da por el paso de un área agropecuaria a su conversión en una zona de parcelaciones de vivienda campestre generando una serie de presiones a los territorios adyacentes como los son las veredas Pantanillo y Perico. Algunas de las presiones observadas son las vías de acceso, evidenciándose una excesiva dependencia de la vía Las Palmas creando con ello un acceso pobre y limitado, creando con ello segregación a cuya población no posee vehículos propios para su desplazamiento. La vulnerabilidad de la población cuya habitación será los nuevos complejos urbanísticos del sector, donde se cuenta con una única vía de acceso al sector y, como se demostró con el cierre total de la autopista Medellín-Bogotá, el valle no está preparado para una contingencia de esta naturaleza. De la misma manera, la presencia de áreas protegidas representa restricciones al cambio de uso de la tierra, pues a mayor distancia de las áreas protegidas mayor es la deforestación. Las áreas sin cobertura vegetal natural están íntimamente ligadas al tipo de tenencia, siendo los predios privados más propensos a aprovechar los recursos naturales disponibles; de manera contraria, las áreas naturales protegidas presentan grados de conservación de los recursos naturales más amplio. Otro aspecto a considerar es el efecto de las vías de acceso, ya que la facilidad en la accesibilidad es uno de los factores que más impactan, aceleran y facilitan la pérdida de cobertura vegetal natural. A menor distancia de los caminos, mayor es el cambio de uso de la tierra como se ha podido evidenciar en el sector del alto de Indiana y con los nuevos desarrollos a ambos márgenes de la vía. Y por último, la distancia a poblados es una variable de altísima importancia, dado que ejerce presión sobre el cambio del uso. La presión que ejerce la población sobre la cobertura vegetal natural es más marcada que la ocasionada por los caminos en algunos sectores. El ejemplo más palpable es el núcleo suburbano del alto de Indiana, el cual ha fungido como ente nucleador de los principales desarrollos urbanísticos del sector, proveyendo los servicios necesarios (comercio, vivienda, centros educativos, servicios públicos, supermercados, comercio en general y transporte) para dar soporte a los nuevos desarrollos inmobiliarios.

## 9 Recomendaciones

Para la realización de un estudio multitemporal se requieren imágenes de varias fechas con las cuales poder construir y discutir la temática del estudio requerido. En el caso particular de este trabajo de grado se emplearon imágenes del sensor LANDSAT por su fácil acceso, su gratuidad y su amplio set de imágenes en el tiempo. Sin embargo, la alta nubosidad característica de la zona de estudio disminuye considerablemente el número de escenas disponibles para su estudio, y además su baja resolución espacial de 30x30 m genera resultados de poco detalle para áreas pequeñas, resultando más aptas para áreas de mayor extensión, en las cuales las variables analizadas sean más regionales. Es por ello que se propone para un segundo estadio emplear imágenes de otros sensores como IKONOS, QUICKBIRD, PLEIADES u otro acorde con el intervalo temporal que se desee analizar, o imágenes de SENTINEL 2 por su gratuidad, alta temporalidad y buena resolución espacial para estudios posteriores al 2015 (año en el cual fue lanzada la misión).

También pueden emplearse imágenes de radar, evitando con ello los problemas de falta de información por nubosidad y aumentando cuantiosamente las escenas para analizar, como las imágenes de acceso gratuito de la plataforma de SENTINEL 1 o solicitar escenas de RADARSAT o TERRASAR. Con dichos sensores se pueden obtener información de las bandas X y C, además de poder realizar procesos polarimétricos e interferogramas, con lo cual el abanico de datos se amplía ayudando a mejorar los análisis posteriores.

Una posible solución a la limitante presentada con las imágenes Landsat, puede ser realizar una fusión de bandas para las misiones que lo permitan, mejorando la resolución espacial de las bandas multiespectrales con la información presente en la banda pancromática presente en las últimas misiones.

Se propone además incluir nuevas variables como la región térmica con lo cual se enriquece las fuentes de información espectral mejorando los algoritmos clasificadores.

## 10 Referencias

- Alcaldía de Envigado. (2001). *POT municipio de Envigado 2001-2010*. Envigado.
- \_\_\_\_\_. (2011). *POT municipio de Envigado 2011-2023*. Envigado.
- \_\_\_\_\_. (2005). *Estrategia de participación ciudadana en la revisión y ajuste al POT Medellín 2005. Conceptos básicos del plan de ordenamiento territorial*.
- \_\_\_\_\_. (2014). *Acuerdo 48 de 2014. Por medio del cual se adopta la revisión y ajuste de largo plazo del Plan de Ordenamiento Territorial del Municipio de Medellín*. Medellín.
- \_\_\_\_\_. (2016). *Formulación Plan Estratégico Territorial de Envigado Resultados taller de escenarios con mesas*.
- \_\_\_\_\_. (2018). <http://www.envigado.gov.co/>
- Alcaldía de El Retiro. (2013). *Plan Básico de ordenamiento territorial. Municipio de El Retiro 2013*. El Retiro.
- Alcaldía de Medellín. (2005). *Estrategia de participación ciudadana en la revisión y ajuste al POT Medellín 2005. Conceptos básicos del plan de ordenamiento territorial*. Medellín.
- Alcaldía de Rionegro. (2011). *Plan Básico de ordenamiento territorial. Municipio de Rionegro. 2011*. El Retiro.
- ARCGIS. (2017). Recuperado de <http://resources.arcgis.com/en/help/main/10.1/index.html#//009t00000042000000>
- Aulló, M. (2013). *La teledetección como herramienta para la evaluación de la vulnerabilidad de ecosistemas forestales latinoamericanos frente al cambio climático: fragmentación y conectividad*. Estado del arte. 18, 22p.
- Botero, L., Palacios, P., y Castrillón, J. (2005). *Revisión y ajuste al plan de ordenamiento territorial del municipio de Envigado* (Tesis de grado). Universidad Nacional de Colombia, Medellín.
- Caballero, JO. 2011. *Dinámica espacio-temporal de la cobertura vegetal natural en el Distrito de Bahía Negra mediante la aplicación del modelo land change modeler*. Tesis Ing. Amb. Asunción, Paraguay, UNA. 70 p.

- Cadavid, P., Restrepo, L., Insuasty, A., Balbín, J., y Fernández, M. (2009). *Víctimas, violencia y despojo. Informe de la investigación acerca de víctimas del conflicto armado*. Medellín: Universidad San Buenaventura.
- Cerda, J., y Villarroel, L. (2008). Evaluación de la concordancia interobservador en investigación pediátrica: Coeficiente de Kappa. *Revista Chilena de Pediatría*, 79(1), 54-58.
- CIAF, Centro de Investigación y Desarrollo de Información Geográfica. (2005). *Interpretación visual de imágenes de sensores remotos y su aplicación en levantamientos de cobertura y uso de la tierra*. Bogotá.
- Congalton, R. G., y Green, K. (2009). *Assessing the Accuracy of Remotely Sensed Data: Principles and Practices* (2 ed.): CRC Press Taylor & Francis Group.
- Contraloría municipal de Envigado. (2015). *Informe del estado de los recursos naturales y del ambiente municipio de Envigado vigencia 2015*. Envigado.
- Correa J., y Múnera, A. (2003). *Procesamiento digital de imágenes Landsat, para la determinación del cambio en las coberturas vegetales, Valle San Nicolás (Antioquia) periodo 1986-2000* (Trabajo de grado). Universidad Nacional de Colombia, Medellín.
- CVC, Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca. (2010). *Guía rápida temática para el usuario sig corporativo uso potencial y zonificación forestal*. Grupo sistema de información ambiental. Valle del Cauca.
- Chander, G., Markham B., y Helder, D. (2009). Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO-1 ALI sensors. *Remote Sensing of Environment*, 113(5), 893–903.
- Chuvieco, E. (1995). *Fundamentos de teledetección espacial*. Madrid, España: Ediciones Rialp S.A.
- Di Gregorio, A., y Jansen, L.J.M. (2000). *Land Cover Classification System (LCCS). Classification Concepts and User Manual*. Roma.
- Diez, P., y Mazzoni, E. (2016). Utilización de las imágenes Landsat en los estudios. Estudio de caso: Crecimiento de las localidades de la cuenca carbonífera del Río Turbio (Providencia de Santa Cruz, Argentina) en el periodo 1986-2015. *Geografía y Sistema de Información Geográfica (GEOSIG). Revista digital del Grupo de Estudios sobre Geografía y Análisis Espacial con Sistemas de Información Geográfica*, 8(8), 12-33.

- ENVI. (2018). Recuperado de: [http://esri.co/Productos/Software\\_especializado/Envi/](http://esri.co/Productos/Software_especializado/Envi/)
- FAO, 1997a; FAO/UNEP, 1999 *IPCC Special Report on Land Use, Land-Use Change And Forestry*.
- Fusilli, L., Marzialetti, P., Laneve, G., y Santilli, G. (2014). Urban growth assessment around Winam Gulf of Kenya based on satellite imagery. *Science Direct*, 279-290.
- GAIA. Grupo de investigación en Gestión y modelación Ambiental, Universidad de Antioquia. (2007). *Mapa de amenaza, vulnerabilidad y riesgo del municipio de Envigado*.
- García, M., Amarilla, S., Rodas, O. y Echeverría, C. (2017). Análisis multitemporal del cambio de uso de la tierra en el departamento del Alto Paraguay, Paraguay. *Investigación Agraria 19(2)*: 93-100.
- Herrera Cardona, V. (06 de febrero, 2018). La ruralidad que se resiste a morir en Envigado. *El Colombiano*. Recuperado de <http://www.elcolombiano.com/antioquia/crecimiento-urbano-y-ruralidad-en-envigado-antioquia-YI8138515>.
- Ingeominas. (2001). *Mapa geológico del departamento de Antioquia, Memoria explicativa, escala 1:400.000*. Medellín.
- Jensen, J.R. (1996). *Introductory Digital Image Processing. A Remote Sensing Perspective*. New Jersey: Prentice Hall.
- Khorram, S., Koch, F.H., Van Der Wiele, C.F., y Nelson, S. (2012). *Remote Sensing*. New York: Springer.
- Liu, T. y Yang, X. (2015). Monitoring land changes in an urban area using satellite imagery, GIS and landscape metrics. *Science Direct*, 42-54.
- Lung, T., Lübker, T., Ngochoch, J., & Schaab, G. (2013). Human population distribution modelling at regional level using very high resolution satellite imagery. *Science Direct*, 36-45.
- Lynch, K. (1959). *La Imagen de la ciudad*. Buenos Aires: Ediciones infinito.
- Lopera, S. (2006). *Revisión normatividad ambiental el POT del municipio de Envigado. Tesis de grado de Especialización en gestión inmobiliaria* (Tesis de grado). Universidad Nacional de Colombia. Medellín.
- Mather, P.M. (1987). *Computer processing of Remotely Sensed images*. Chichester. John Wiley.
- Mendoza, S. y Etter, A. (2002). Multitemporal analysis (1940-1996) of land cover changes in the southwestern Bogotá highplain (Colombia). *Landscape and urban planning*, 59: 147-158.

- Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. (2004). *Serie Planes de Ordenamiento Territorial, Guía Metodológica 1. Información práctica para formulación de planes de ordenamiento territorial*. Bogotá.
- Monterroso, F. (2013). *Guía práctica: clasificación de imágenes satelitales*. Manizales. 20 p
- Municipio de Envigado. (2005). *Plan de Desarrollo 2005 – 2007*. Envigado.
- Muñoz, D., Rodríguez, M., y Romero, M. (2009). Análisis multitemporal de cambios de uso del suelo y coberturas en la microcuenca las minas, corregimiento de La Laguna, municipio de Pasto, Departamento de Nariño. *Revista Universidad de Nariño*, 1-10.
- Osorio, M, y Ángel, S. (2005). *Apoyo a la revisión y ajuste al plan de ordenamiento territorial del municipio de Envigado. Usos del suelo y tratamientos urbanísticos* (Tesis de grado). Universidad Nacional de Colombia, Medellín.
- Palacio Tamayo, D. y Serna, J. F. (19 de agosto, 2016). Preocupación por crecimiento urbano del 4% en el alto de Las Palmas. *Vivir en el Poblado*. Recuperado de <http://www.vivirenelpoblado.com/periodico/preocupacion-por-crecimiento-urbano-del-4-en-el-alto-de-las-palmas>
- Palomino, S, y Anaya, J. (2014). *Sinergia entre datos ópticos y radar para determinar coberturas del suelo: resultados preliminares para la región de Urabá*.
- Parody, Marcela y Zapata, Eudes (2015). Estudio multitemporal de la deforestación en Colombia utilizando procesamiento de imágenes. *Ingenio Ufpso* 8, 159-175
- Parra, A. (2014). *Análisis Digital de Imágenes de Teledetección. Teoría y Práctica*. Universidad de los Andes. Mérida, Venezuela.
- Pernia, J. y López, J. (2001). Rectificación de una imagen Spot con puntos de control obtenidos por GPS diferencial. *Revista Forestal de Venezuela*, 45 (15): 65-77.
- Pond. B y Yeates, M. (1994). Rural/Urban Land Conversion II. Identifying Land in Transition to Urban Use. *Urban Geography*, 15(1), 25-44.
- Pozzobon, E. (2001). Clasificación automatizada de la vegetación de la reserva forestal de Tiporo mediante imágenes HRV Spot. *Revista Forestal de Venezuela*, 45 (1): 79-86.
- Pryor, R.J. (1968). Defining the Rural-Urban Fringe. *Social Forces*, 47(2), 2002-2015.



- Quiasua, A., Corredor, A., y Puentes, D. (2016). Análisis multitemporal del cambio de coberturas de la localidad ciudad Bolívar tecnología Claslite. *Boletín Semillas Ambientales* 10(2), 38-45
- Ramírez Velásquez, B.R. (2007). *De suburbio y la periferia al borde: El modelo de crecimiento de la zona metropolitana del Valle de México (ZMVM)*. México D.F: Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Xochimilco.
- Restrepo Y Toussaint, 1974. Obducción cretácica en el occidente colombiano. *Anales de la facultad de minas*, 58: 73-105.
- Riaño, O. (2002). Consideraciones y métodos para la detección de cambios empleando imágenes de satélite en el municipio de Paipa. *Colombia Forestal*, 7 (15): 41-62.
- Rodríguez, A. F. (2011). *Metodología para detectar cambios en el uso de la tierra utilizando los principios de la clasificación orientada a objetos, estudio de caso piedemonte de Villavicencio, Meta* (Trabajo de grado). Universidad Nacional de Colombia, Bogotá.
- Sacristán, F. (2006). La teledetección satelital y los sistemas de protección ambiental. *Revista electrónica de discusión científica Civilizar*. 1-35
- Sánchez, V. y Mejía, J. (2002). *Entre la Montaña y el Río, tomo II*. Medellín: Editorial Lealon.
- Secretaria de Medio Ambiente y Desarrollo Agropecuario. (2013). *GDB de la Actualización del mapa de coberturas vegetales, análisis multitemporal y métrica del paisaje del municipio de Envigado*. Envigado.
- 
- \_\_\_\_\_ (2015). *Documento soporte a la formulación de la política pública de desarrollo agropecuario del municipio de Envigado*. Envigado.
- Suarez, Ca. (2016). *El concepto de borde a partir de los factores de formación* (Trabajo de grado). Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México-
- Tangarife Márquez, P. A. y Castrillón Castaño, A. G. (2004). *Evaluación y aplicación de métodos de zonificación de la susceptibilidad por deslizamiento, usando sig's, en el municipio de envigado* (Trabajo de grado). Universidad Nacional de Colombia, Medellín.
- Tengil, H., Franco, S., Nava, G., y Ordoñez, J. (2015). Evaluación de las técnicas para el estudio del cambio de ocupación del suelo y propuesta metodológica para solventar algunas de sus inconsistencias: el parque nacional Nevado de Toluca, México. *Geofocus* 16, 61-86.

- Vicens L, (2009). *Fuentes y Adquisición de Datos: Lección 9, Clasificación de Imágenes, Programa UNIGIS de Postgrado y Master Internacional a distancia en Sistemas de Información Geográfica*. UNIGIS Girona, Universitat de Girona
- Virtanen, T., Mikkola, K., Patova, E., y Micula, A. (2002). Satellite image analysis of human caused changes in the tundra vegetation around the city of Vorkuta, northEuropean Russia. *Environmental Pollution*, 120(3), 647-658.
- Vitola Urango, J. E. (2008). *Unidad de monitoreo en el tramo sur de la sección de metroplus en el municipio de Envigado* (Trabajo de grado de especialización). Universidad Nacional de Colombia, Medellín.
- Walsh, J., Davis, F., y Peet, R. (1994). Applications of remote sensing and geographic information systems in vegetation science. *Journal of Vegetation Science*, Special feature (5): 610-613.
- USGS. (2017). Recuperado de <https://www.usgs.gov/>
- \_\_\_\_\_. (2018). Recuperado de <https://landsat.usgs.gov/landsat-8>