

Análisis multitemporal mediante imágenes Landsat de la expansión urbana de Popayán Cauca, en el periodo 1999-2023

Multi-temporal analysis using Landsat images of the urban expansion of Popayán Cauca, in the period 1999-2023

David Julian Leyton Castro
david.leyton00@usc.edu.co

Oscar Eduardo Fernández
oscar.fernandez01@usc.edu.co

Universidad Santiago de Cali, Facultad de Ingeniería, Especialización en Sistemas de Información Geográfica (1)
Universidad Santiago de Cali, Facultad de Ingeniería, Especialización en Sistemas de Información Geográfica (2)

Resumen.

El análisis multitemporal de la expansión urbana en la ciudad de Popayán, entre los años 1999 y 2023, es un estudio integral que se enfoca en el uso de Sistemas de Información Geográfica (SIG) para comprender y visualizar el crecimiento de la ciudad a lo largo de un período de 24 años. Este trabajo de grado tiene como objetivo principal analizar cómo se ha comportado la expansión urbana de Popayán en el período 1999-2023 mediante el procesamiento de imágenes satelitales. Para llevar a cabo este análisis, se recopiló datos cartográficos e imágenes de satélites de diferentes años, lo que permitió representar el cambio en el tiempo de la expansión urbana. Se aplicaron técnicas de procesamiento de imágenes, como la detección de cambios y la clasificación de tierras, para identificar áreas urbanas y rurales, así como su transformación a lo largo del tiempo. Los resultados de este estudio revelan tendencias significativas en la expansión de Popayán, destacando un crecimiento constante de la ciudad hacia las zonas de la periferia y cerros tutelares. Este análisis multitemporal no solo ofrece una visión retrospectiva de la expansión urbana en Popayán, sino que también proporciona información valiosa para la toma de decisiones futuras en términos de desarrollo sostenible, planificación territorial y conservación del entorno natural. En última instancia, este artículo muestra la utilidad de los SIG como herramientas eficaces para el análisis espacial y la planificación urbana en una región en constante evolución como Popayán.

Palabras: Análisis multitemporal, SIG, Popayán, Imágenes Landsat, expansión urbana.

Abstract

The multi-temporal analysis of urban expansion in the city of Popayán, between 1999 and 2023, is a comprehensive study that focuses on the use of Geographic Information Systems (GIS) to understand and visualize the growth of the city throughout over a period of 24 years. The main objective of this degree work is to analyze how the urban expansion of Popayán has behaved in the period 1999-2023 through the processing of satellite images. To carry out this analysis, cartographic data and satellite images from different years were collected, which made it possible to represent the change over time of urban expansion. Image processing techniques, such as change detection and land classification, were applied to identify urban and rural areas, as well as their transformation over time. The results of this study reveal significant trends in the expansion of Popayán, highlighting a constant growth of the city towards the peripheral areas and tutelary hills. This multi-temporal analysis not only offers a retrospective view of urban expansion in Popayán, but also provides valuable information for future decision-making in terms of sustainable development, territorial planning and conservation of the natural environment. Ultimately, this article shows the usefulness of GIS as effective tools for spatial analysis and urban planning in a constantly evolving region like Popayán.

Keywords: Multi-temporal analysis, GIS, Popayán, Landsat images, Urban expansion

1. INTRODUCCIÓN

El crecimiento urbano a gran escala es un componente central de los cambios de cobertura y uso del suelo que amenazan gravemente la conservación de la flora y fauna presente en los ecosistemas en las grandes ciudades, y a medida que la demanda de predios para construir asentamientos e infraestructuras continúa aumentando, las urbanizaciones se extienden más allá de las áreas urbanas consolidadas y sus alrededores. Por tanto, incrementan las zonas urbanizadas dispersas, a las cuales se les denomina áreas de expansión o dispersión urbana. (Concepción., 2022).

Los factores que impulsan el crecimiento urbano pueden ser de naturaleza socioeconómica, geográfica o física y generalmente se identifican como fuerzas impulsoras del desarrollo de asentamientos irregulares, especialmente en las afueras de la zona urbana. Este fenómeno ocurre a menudo porque las viviendas o lotes se consiguen a un precio más bajo. Sin embargo, estas viviendas carecen de servicios básicos, lo que aumenta los problemas sociales y ambientales en los barrios marginales (Ríos Sánchez, 2021).

Popayán, como una ciudad de gran relevancia histórica y cultural, ha enfrentado desafíos en su crecimiento y desarrollo urbano. Factores como la migración interna, el desarrollo económico y la planificación urbana han desempeñado un papel fundamental en su expansión. A medida que la ciudad se expande, se generan nuevas dinámicas en términos de uso del suelo, infraestructura, transporte y calidad de vida de sus habitantes. El análisis multitemporal se convierte en una herramienta esencial para identificar patrones, tendencias y desafíos emergentes en el contexto urbano de Popayán (MERA, 2016).

La superposición de mapas de diferentes periodos históricos es un instrumento que sirve para analizar cambios en la configuración espacial del uso del suelo en un tiempo determinado. De esta forma se puede identificar el avance del modelo de distribución espacial de cada categoría. (Humacata, 2020)

De acuerdo con (López Castrillon; Juan Carlos, 2020) el Censo Nacional de Población y Vivienda realizado por el DANE en 2018, Popayán contaba con 318.059 habitantes, de los cuales 51.498 vivían en zona rural, equivalente al 14% de la población del municipio, y 266.561 vivían en zona urbana. al 86% de la población.

Debido a este fenómeno el análisis multitemporal del uso del suelo y variación en la cobertura vegetal permite evaluar, comprobar y establecer como ha sido los cambios de vegetación, la expansión urbana y las causas de los cambios en las zonas de estudio utilizando técnicas de teledetección mediante comparación digital de imágenes satelitales (Rosero, 2018)

La detección de cambios consiste en identificar los diferentes estados de una característica o fenómeno a partir de observaciones realizadas en diferentes momentos. Las imágenes de teledetección ofrecen una fuente de datos invaluable para detectar y rastrear cambios en ciertos fenómenos como la expansión urbana. (Triana, 2023).

Los sensores remotos son los instrumentos utilizados para recopilar información rápida y viable de un objeto, área o fenómeno a distancia, y que así mismo con la información obtenida se pueda procesar e interpretar mediante el uso de Sistemas de Información Geográfica (SIG) permitiendo así el análisis de imágenes satelitales (García & et al, 2020).

Así mismo el uso de imágenes satelitales Landsat (Niño, 2020), permite realizar un analisis multitemporal desde el año 1999 hasta el 2023, teniendo en cuenta la calidad de las imágenes, sus resoluciones espaciales y temporales, donde se encuentra la ciudad de Popayán.

Por ello se debe tener en cuenta el Plan de Ordenamiento Territorial de Popayán, que es el instrumento con el que cuenta el municipio para crear los escenarios de vivienda urbana y rural, comprendiendo las relaciones con el entorno natural. Por lo tanto, se hace necesario considerar los diferentes escenarios del suelo urbano y su posible expansión, el seguimiento y control de las obras de edificación, modificaciones de las construcciones en el sector histórico, edificaciones en áreas de reserva ambiental, construcción en terrenos no aptos por encontrarse en zonas de movimientos en masa, verificación del cumplimiento de las licencias de construcción, obras en el espacio público y el acatamiento de los lineamientos al respecto del inspección urbana en ejecución de obra. (López Castrillon; Juan Carlos, 2020)

El objetivo de este artículo es analizar cómo se ha comportado la expansión urbana de Popayán en el período 1999-2023 mediante el procesamiento de imágenes satelitales, donde se permita identificar las áreas de expansión no

relacionadas en el POT, los objetivos específicos pretenden caracterizar temporalmente el área urbana de la ciudad de Popayán con base en imágenes satelitales LandSat, determinar la expansión urbana utilizando técnicas de teledetección como preprocesamiento, entrenamiento de software, clasificación supervisada y procesamiento de las imágenes LandSat y calcular la tasa anual de cambios de la superficie cubierta en el periodo 1999 a 2023 con el fin de realizar el análisis de la expansión urbana de la ciudad de Popayán.

Lo anterior debido a la falta de actualización del POT y la poca planificación de las áreas de expansión urbana por parte de las entidades gubernamentales, puesto que se viene presentando un crecimiento hacia la periferia de la ciudad generando impactos ambientales y sociales.

A través de este artículo, se utilizan herramientas SIG aplicadas a la planificación urbana que permitan proporcionar información oportuna a las entidades locales competentes para mejorar la condición de calidad de vida de los habitantes de Popayán, y de esta manera aportar lineamientos para actualizaciones futuras de los planes de ordenamiento territorial POT.

2. MATERIALES Y MÉTODOS/METODOLOGÍA

Para el desarrollo de esta investigación se propuso una metodología de tipo mixta, donde se presenta un enfoque cuantitativo obteniendo resultados porcentuales del área de expansión urbana y la tasa anual de cambio de cobertura, además, el análisis cualitativo realiza una revisión bibliográfica del crecimiento, proponiendo un análisis multitemporal de la expansión urbana de la ciudad de Popayán.

El análisis multitemporal de la expansión urbana mediante imágenes satelitales Landsat implica varios pasos para la obtención de los resultados.

2.1 LOCALIZACIÓN

Para el desarrollo de esta investigación se seleccionó el Municipio de Popayán, capital del Departamento del Cauca, el cual está ubicado al suroeste de Colombia, al pie de la Cordillera Central.

2.2. ADQUISICIÓN DE IMÁGENES SATELITALES:

Para realizar el análisis multitemporal de cómo se ha presentado el crecimiento urbano en la ciudad de Popayán, se cuenta con imágenes satelitales Landsat (USCG, 2023), entre los años 1999 a 2023, con el fin de efectuar el procesamiento y así obtener los resultados necesarios para apoyar en la toma de decisiones futuras

2.3. PREPROCESAMIENTO DE IMÁGENES:

Una vez obtenidas las imágenes, se debe realizar el preprocesamiento, en este punto se efectúa la corrección de errores de radiación, la corrección de geometría y la normalización de las imágenes. para el preprocesamiento de las imágenes se utilizó el software QGIS.

2.4 PROCESAMIENTO DE IMÁGENES:

Con las imágenes corregidas atmosféricamente, se procede a realizar el entrenamiento en el software QGIS y SAGAGIS, con la finalidad de obtener una clasificación supervisada con los métodos de mínima distancia y Mahanalobis, para lograr resultados más acordes a la investigación.

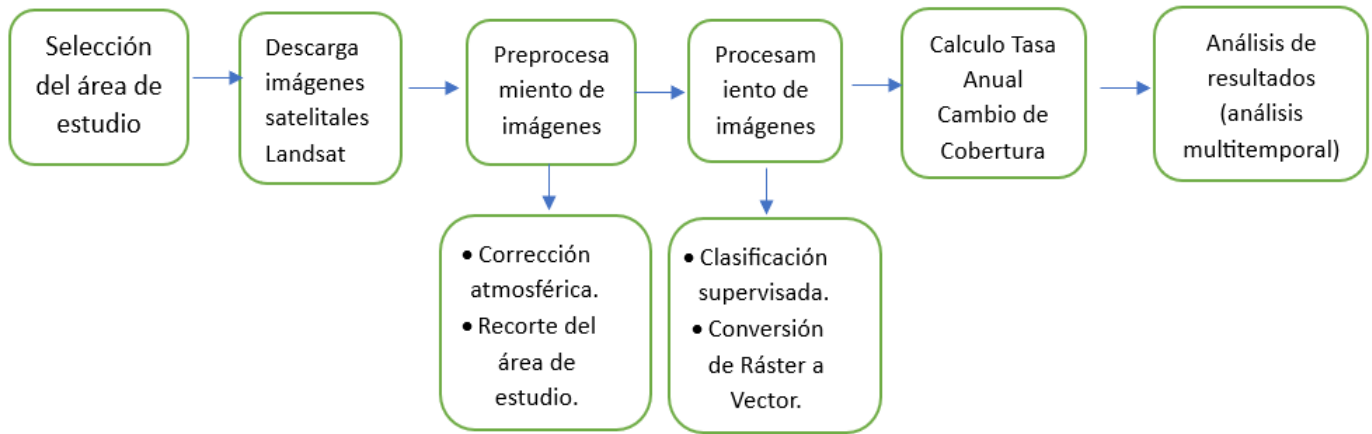
2.5. TASA ANUAL DE CAMBIO DE COBERTURAS:

El calculo de la tasa anual de la cobertura permite monitorear los cambios en la superficie cubierta a través del tiempo, estos resultados pretenden apoyar en la toma de decisiones y genera unos lineamientos para el ordenamiento y la gestión ambiental de la ciudad.

2.6. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS:

Los resultados obtenidos del procesamiento de las imágenes permiten identificar como ha sido el cambio de la expansión en los últimos años de áreas que han experimentado un aumento urbano y mediante la revisión bibliográfica se analizan los factores determinantes que pueden estar impulsando este crecimiento.

Figura 2. Esquema de metodología.



Fuente: Los autores.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

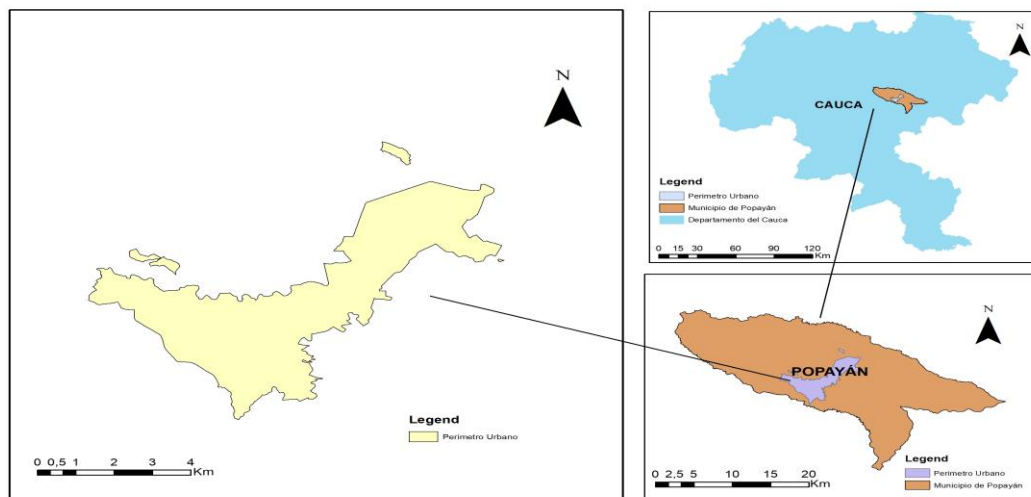
Con el Software QGIS, inicialmente se realizó el recorte de las imágenes satelitales creando un polígono del área de la ciudad de Popayán, posteriormente a través del complemento Semi-Automatic Classification Plugin (SCP), el cual permite la clasificación supervisada de imágenes Landsat, suministrando herramientas para la descarga, el preprocesamiento y el posprocesamiento de las imágenes seleccionadas (Congedo, 2023).

3.1 LOCALIZACIÓN

El Municipio de Popayán, capital del Departamento del Cauca, está ubicado al suroeste de Colombia, al pie de la Cordillera Central. El casco municipal está situado en el Valle de Pubenza, situado a los 2° 26' 39" de Latitud Norte y 76° 37' 17" de Longitud Oeste con una altitud media sobre el nivel del mar de 1.738 metros. El centro urbano presenta diferentes alturas en el territorio donde los más altos son los cerros de San Rafael Alto, Canelo, Puzná, Santa Teresa, Tres Tulpas y La Tetilla, siendo Puzná el más alto con una altitud de 3.000 metros sobre el nivel del mar. Limita al norte con los municipios de Cajibío y Totoró, al este con Totoró y Puracé, al sur con Sotará, al este con Puracé, al oeste con Timbío y El Tambo. (Popayán, Alcaldía de Popayán, 2023)

Figura 1. Localización área de estudio.

MAPA LOCALIZACION AREA URBANA DE POPAYÁN CAUCA



Fuente: Los Autores

3.2 IMÁGENES SATELITALES

Para realizar el análisis multitemporal se adquirieron las imágenes satelitales de los años 1999, 2016 y 2023 a las cuales se le aplicaron criterios como coberturas de nubes y rangos de fecha, se obtuvieron las tres imágenes relacionadas en la siguiente tabla.

Tabla 1. Imágenes Satelitales Landsat

| Sensor | Imagen | Resolución espacial | Fecha |
|-----------|------------------------------------------|-------------------------|------------|
| Landsat 5 | LT05_L1TP_009058_19990710_20200907_02_T1 | MS – 30 m | 1999-07-10 |
| Landsat 8 | LC08_L1TP_009058_20160825_20200906_02_T1 | MS – 30 m PAN – 15 m | 2016-08-25 |
| Landsat 8 | LC08_L1TP_009058_20230509_20230517_02_T1 | MS – 30 m PAN – 15 m | 2023-05-09 |

Fuente: Los Autores.

Las imágenes satelitales obtenidas de la página de USGS al momento de la descarga tienen definidas las siguientes coordenadas, con las cuales se realizó el análisis temporal.

SISTEMA DE COORDENADAS: WGS 1984 UTM ZONA 18N

PROYECCIÓN: UTM

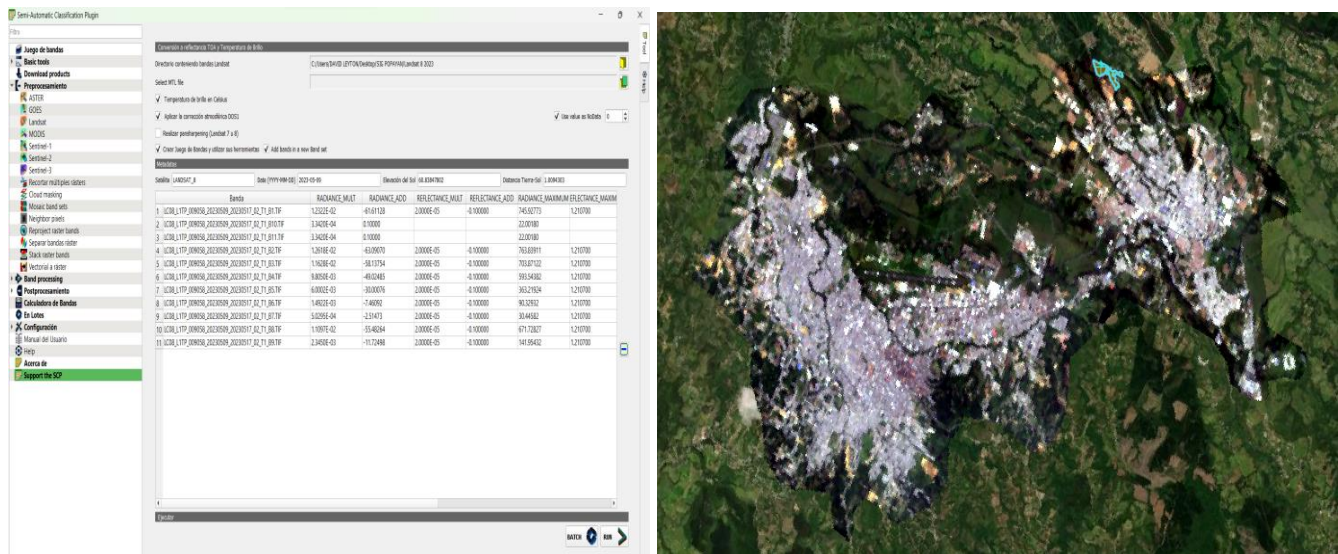
DATUM: WGS 1984

PATH: 9 ROW: 58

3.3 PREPROCESAMIENTO

A través de la herramienta de preprocesamiento de SCP se realizan las correcciones atmosféricas de cada una de las imágenes satelitales, se aplica la corrección DOS1 (Dark Object Substrction), según (Chávez, 1996) explica que la corrección se basa en la suposición de que algunos píxeles de la imagen están completamente en sombra, lo que provoca que sus radiancias recibidas en el satélite sean el resultado de la dispersión atmosférica, también conocido como efecto bruma. Esta suposición se basa en el hecho de que prácticamente ningún objeto en la superficie de la Tierra tiene un color negro absoluto. Por tanto, es más preciso tener en cuenta una reflectancia asumida de un uno por ciento en lugar de cero por ciento.

Figura 3. Corrección Atmosférica DOS1, aplicada a imagen satelital Landsat 8, año 2023, bandas 4,3,2. Fuente propia.

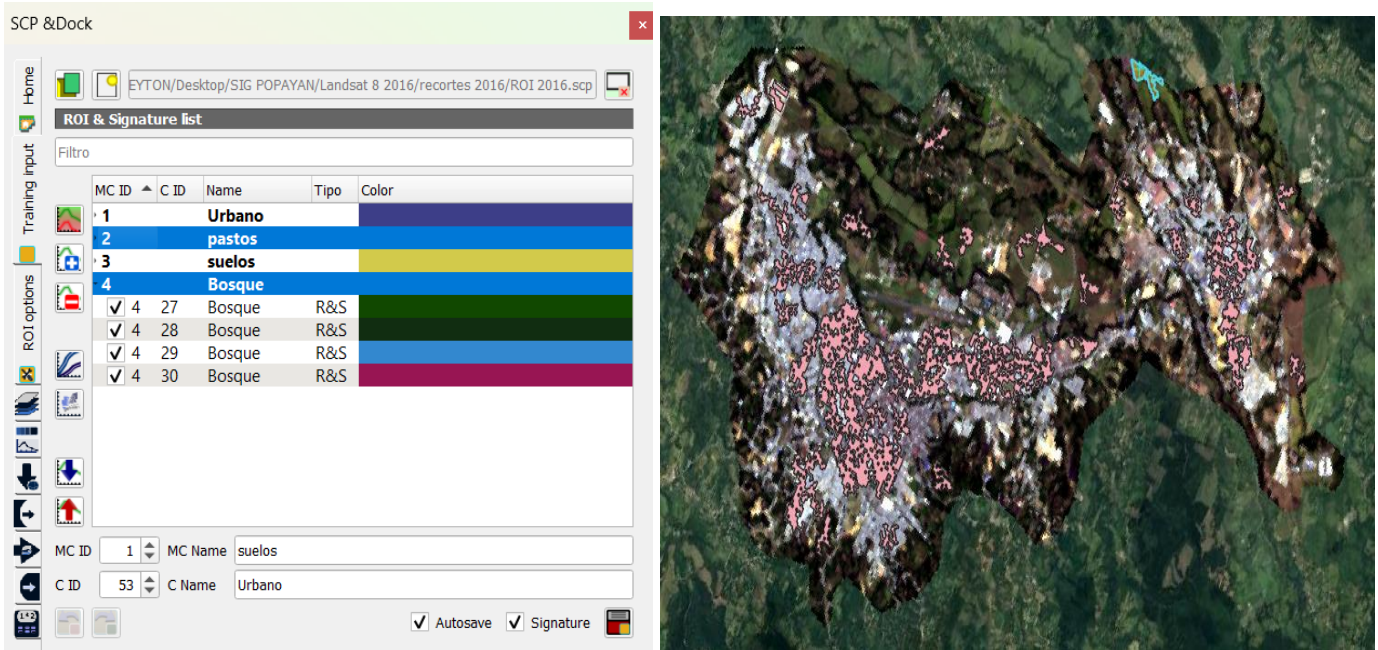


Fuente: Los Autores.

3.4 ENTRENAMIENTO.

Con las imágenes satelitales corregidas, se debe realizar el entrenamiento de cada una de acuerdo con las diferentes coberturas del suelo, para generar una clasificación supervisada, por lo tanto, se divide en cuatro tipos de cobertura, urbana, suelos desnudos, pastos y bosques, estas clasificaciones se ejecutan mediante Regiones de Interés (ROIs), también conocidas como Áreas de Entrenamiento, para cada una de las clases de cobertura del suelo identificadas en la imagen. Las ROIs son polígonos que se dibujan sobre áreas homogéneas de la imagen y se superponen a píxeles de la misma clase de cobertura del suelo. (Congedo, 2017).

Figura 4. Entrenamiento de clasificación con ROIs, aplicada a imagen satelital Landsat 8, año 2016, bandas 4,3,2.

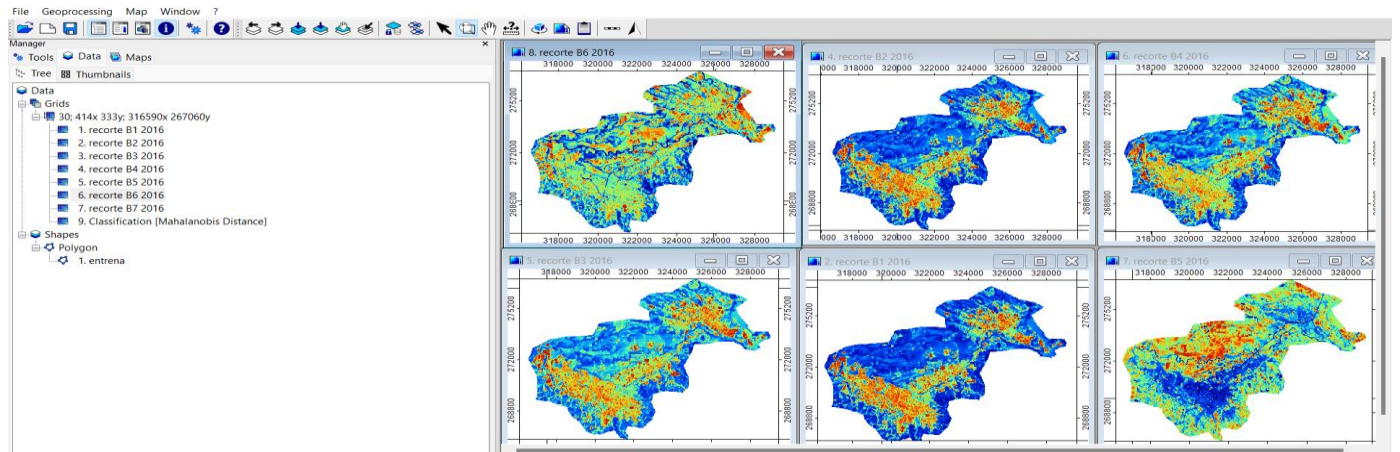


Fuente: Los Autores.

3.5 CLASIFICACIÓN SUPERVISADA EN SAGAGIS.

Con las Áreas de Entrenamiento establecidas, se realizó el cargue de las bandas de la imagen Landsat 8, de la uno a la siete, al software SAGAGIS, para realizar la ejecución de la clasificación supervisada.

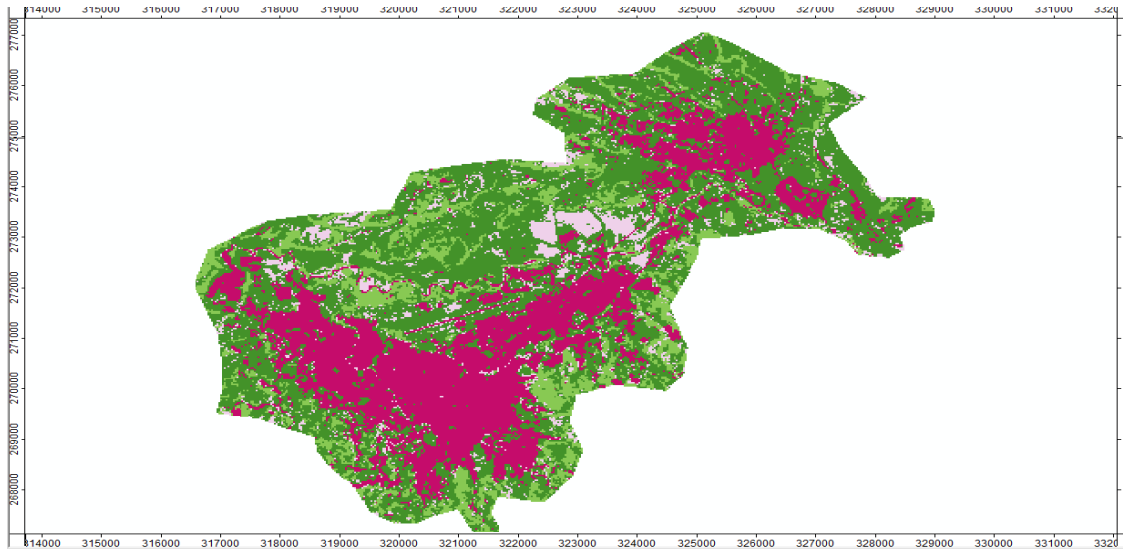
Figura 5. Imágenes de las bandas de imagen Landsat 8, SAGAGIS. Fuente Propia.



Fuente: Los Autores.

La clasificación supervisada se realizó mediante el método de distancia de Mahalanobis que como indica (Álvarez, 2010) es un tipo de distancia ponderada que considera la matriz de covarianza de un conjunto de datos para establecer la ponderación. El elipsoide que mejor representa la distribución de probabilidad del conjunto de datos X corresponde a la matriz de covarianza que caracteriza la distancia.

Figura 6. Imagen clasificada por método de distancia de Mahalanobis, SAGAGIS, imagen Landsat 2016.



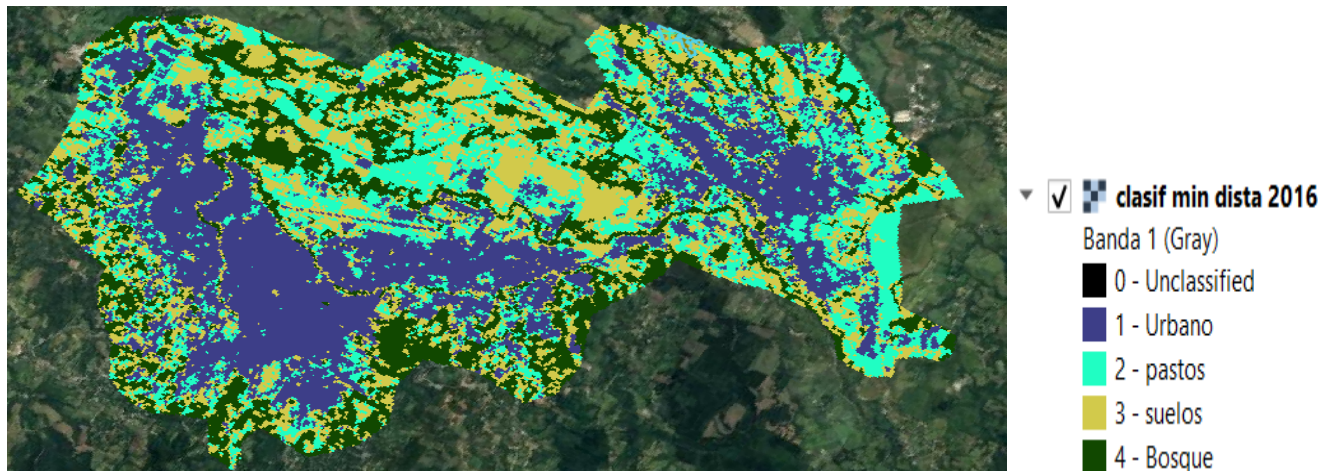
Fuente: Los Autores.

3.6 CLASIFICACION SUPERVISADA QGIS

Con las clasificaciones supervisadas de las tres imágenes satelitales seleccionadas se procedió a realizar un nuevo entrenamiento en el complemento SCP de QGIS, al encontrar que estas clasificaciones presentan distorsiones frente a las imágenes originales.

Por lo tanto, se realizó una nueva clasificación mediante el método de mínima distancia que de acuerdo con (Zabala, 2019) que establece que cada clase tiene una reflectividad media en cada una de las bandas. Podemos considerar cada clase como un centroide en un espacio de variables.

Figura 7. Clasificación Supervisada mediante método de Mínima Distancia, QGIS, imagen Landsat 2016.



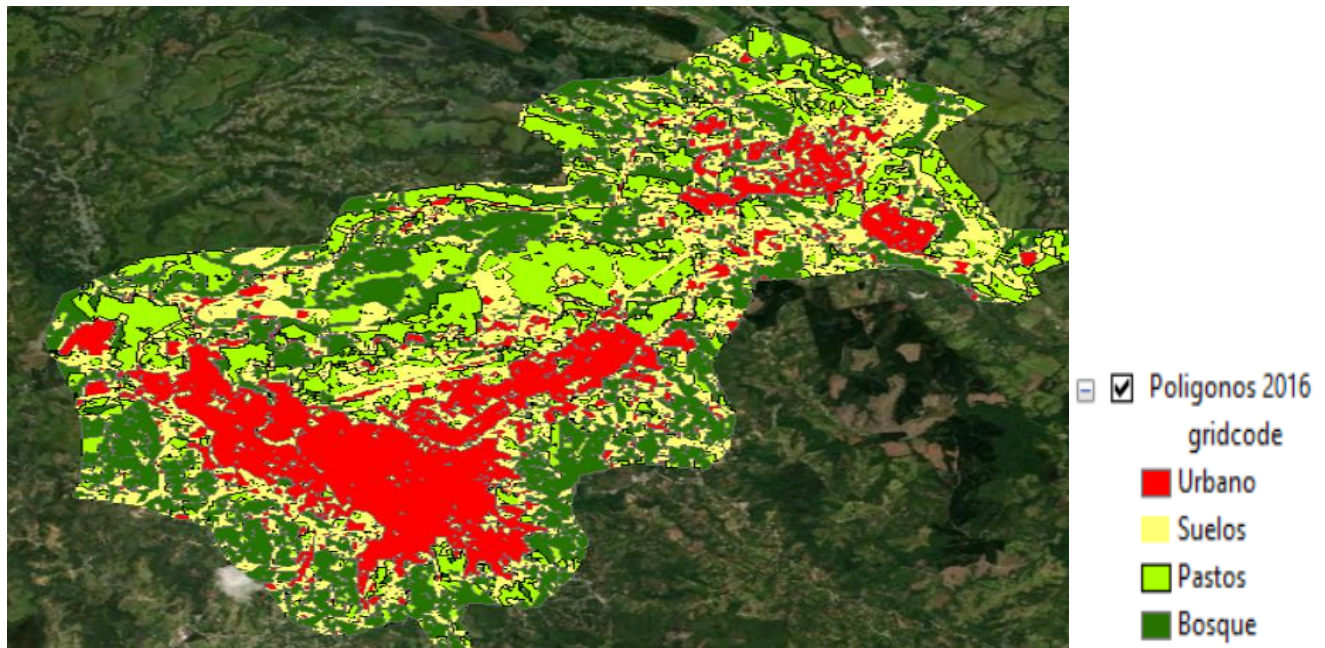
Fuente: Los Autores.

Esta clasificación por mínima distancia en cada imagen arrojó mejores resultados, donde la cobertura tipo urbano se logra distinguir en la figura 5 de color azul.

3.7 PROCESAMIENTO CON ARCGIS DESKTOP.

Se procede a realizar el cargue de las imágenes satelitales y mediante el uso de las herramientas de ArcGIS Desktop, se obtiene de Ráster a Polígono con la finalidad de determinar las áreas y perímetros de cada imagen, por ello se extrae la cobertura urbana generada en las clasificaciones supervisadas, y así efectuar el análisis de la expansión urbana de la ciudad de Popayán.

Figura 8. Imagen Lansadt 2016, clasificación polígonos.



Fuente: Los Autores.

3.8 ANALISIS MULTITEMPORAL

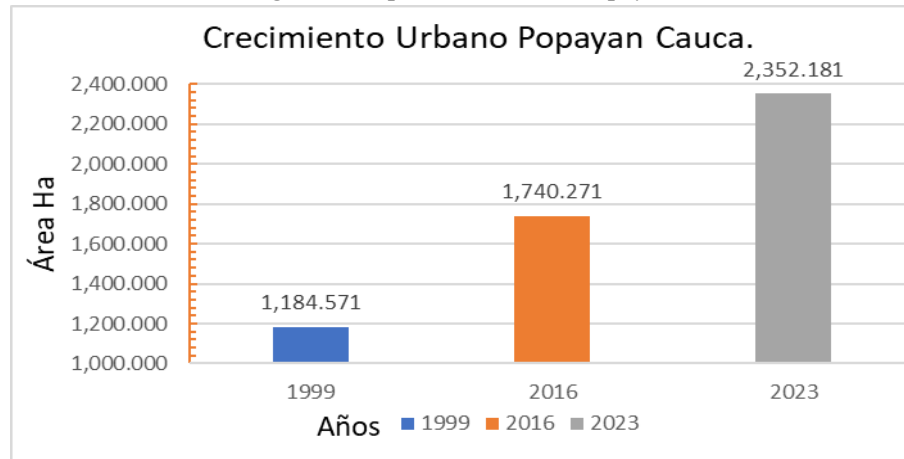
Con el procesamiento de las imágenes Landsat de los años 1999, 2016 y 2023 se logró determinar el área de expansión urbana de la ciudad de Popayán Cauca, generando polígonos para cada año, asimismo a cada uno se le calculó el área.

Tabla 2. Área expansión urbana Popayán Cauca.

| Año | Área Urbana (Ha) | Crecimiento (Ha) | Porcentaje cambio % |
|------|------------------|------------------|---------------------|
| 1999 | 1184,571 | 0 | 0 |
| 2016 | 1740,271 | 555,7 | 46.91 |
| 2023 | 2352,181 | 611,91 | 51.65 |

Fuente: Los Autores.

Figura 9. Expansión Urbana Popayán.

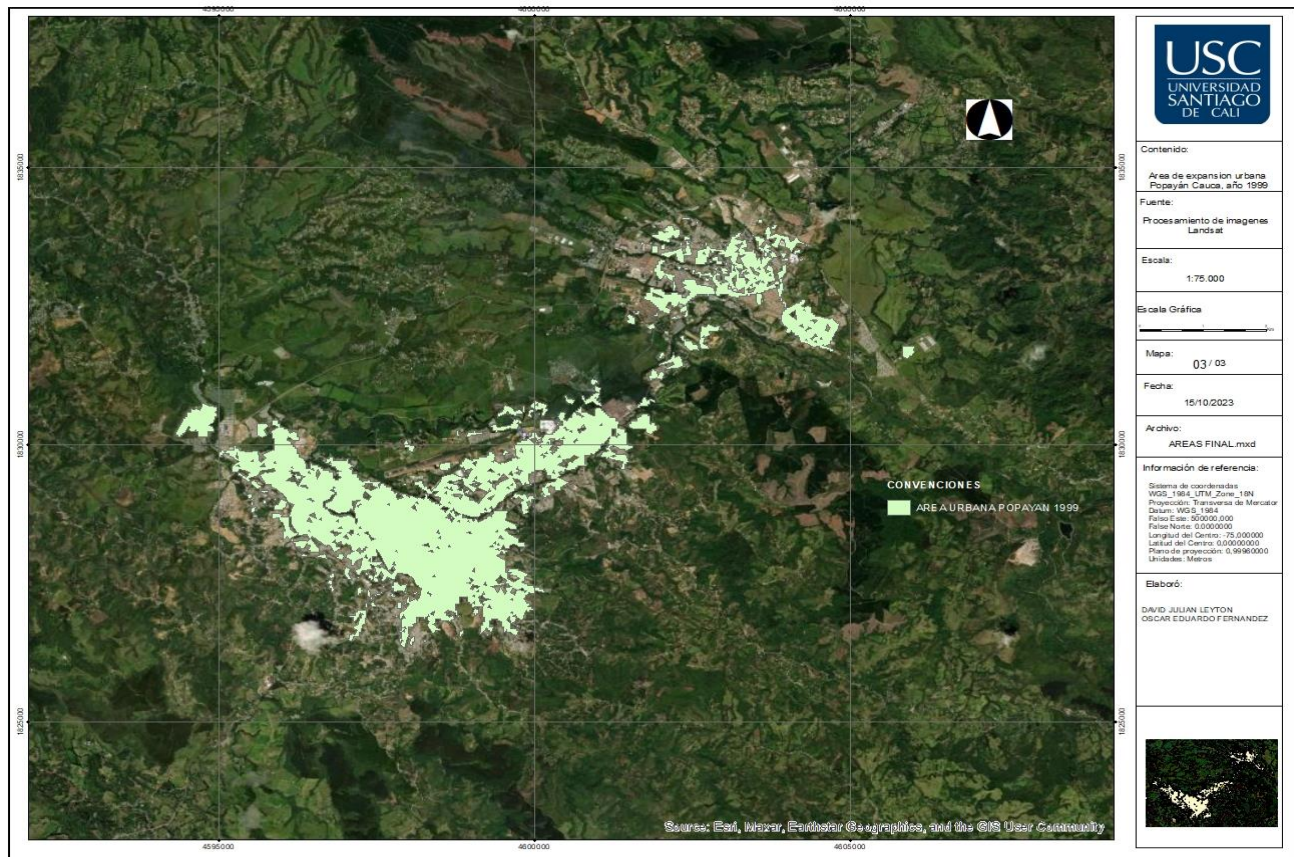


Fuente: Los Autores.

Para el periodo entre 1999 y 2016, la expansión urbana en Popayán presentó un cambio en el área (Ha) pasando de 1184.571 Ha en 1999 a 1740.271 Ha, presentando un crecimiento urbano de 555.7 Ha, este crecimiento se da en parte hacia las zonas de expansión incluidas en el Plan de Ordenamiento Territorial (POT), el cual indica una expansión hacia la zona Nor-Oriente y Nor-Occidente, además hacia la zona Suroccidente del casco urbano (Popayán, 2002).

Para los años 2016 y 2023, la expansión mostró un cambio en el área urbana pasando de 1740.271 Ha a 2532.181 Ha, presentando un crecimiento urbano de 611.91 Ha, siendo significativo el cambio de áreas en poco tiempo, hacia las zonas de expansión del POT y otros hacia los cerros tutelares de ciudad.

Figura 10: Área urbana de Popayán, Cauca, año1999, procesamiento de imágenes Landsat.



Fuente: Los Autores.

Este cambio entre los años 2016 y 2023 se presenta según (Macuacé & Cortés, 2021) a que Popayán se convierte en un lugar de acogida para personas que provienen de otros municipios y departamentos. Esto incluye a personas desplazadas en su mayoría por el conflicto armado y también a estudiantes que buscan continuar su formación profesional. Uno de los factores que influye en la inmigración a la ciudad es la posibilidad de acceder a bienes y servicios de consumo a precios más bajos en comparación con otros municipios del país. Además, la opción de desplazarse a pie o en bicicleta dentro de la zona urbana reduce los costos de transporte.

3.9 TASA ANUAL DE CAMBIO DE LA SUPERFICIE CUBIERTA.

Con la información obtenida para cada periodo se realizó el cálculo de la tasa anual de cambio de la superficie de la cubierta por diferentes coberturas, este indicador permite monitorear los cambios en la superficie cubierta por diferentes coberturas de la tierra a través del tiempo propuesto por el IDEAM (IDEAM, 2017).

Para los cálculos de la tasa de cambio de la superficie se utilizó la fórmula matemática que corresponde:

$$TDCD_{jt} = \left(\left(\frac{SCT_{ijt2}}{SCT_{ijt1}} \right)^{\frac{1}{t2-t1}} - 1 \right) * 100$$

Fuente: (IDEAM, 2017)

En donde:

$TDCD_{jt}$: Es el promedio anual de cambio en la superficie que ocupa la cubierta de la tierra i , en la unidad espacial de referencia j entre dos instantes de tiempo t_1 y t_2 .

SCT_{ijt2} y SCT_{ijt1} : Son las superficies que ocupa la cubierta de la tierra i , en la unidad espacial de referencia j en los instantes de tiempo inicial t_1 y final t_2 , respectivamente.

t_2 y t_1 : Son los años correspondientes al instante de tiempo inicial t_1 y final t_2 , respectivamente.

Tabla3. Tasa Anual Cambio Cobertura Popayán.

| AÑOS | | |
|-----------------------------------------------|-----------|-----------|
| Tasa anual de cambio de cobertura Popayán (%) | 1999-2016 | 2016-2023 |
| | 2.28 | 4.4 |

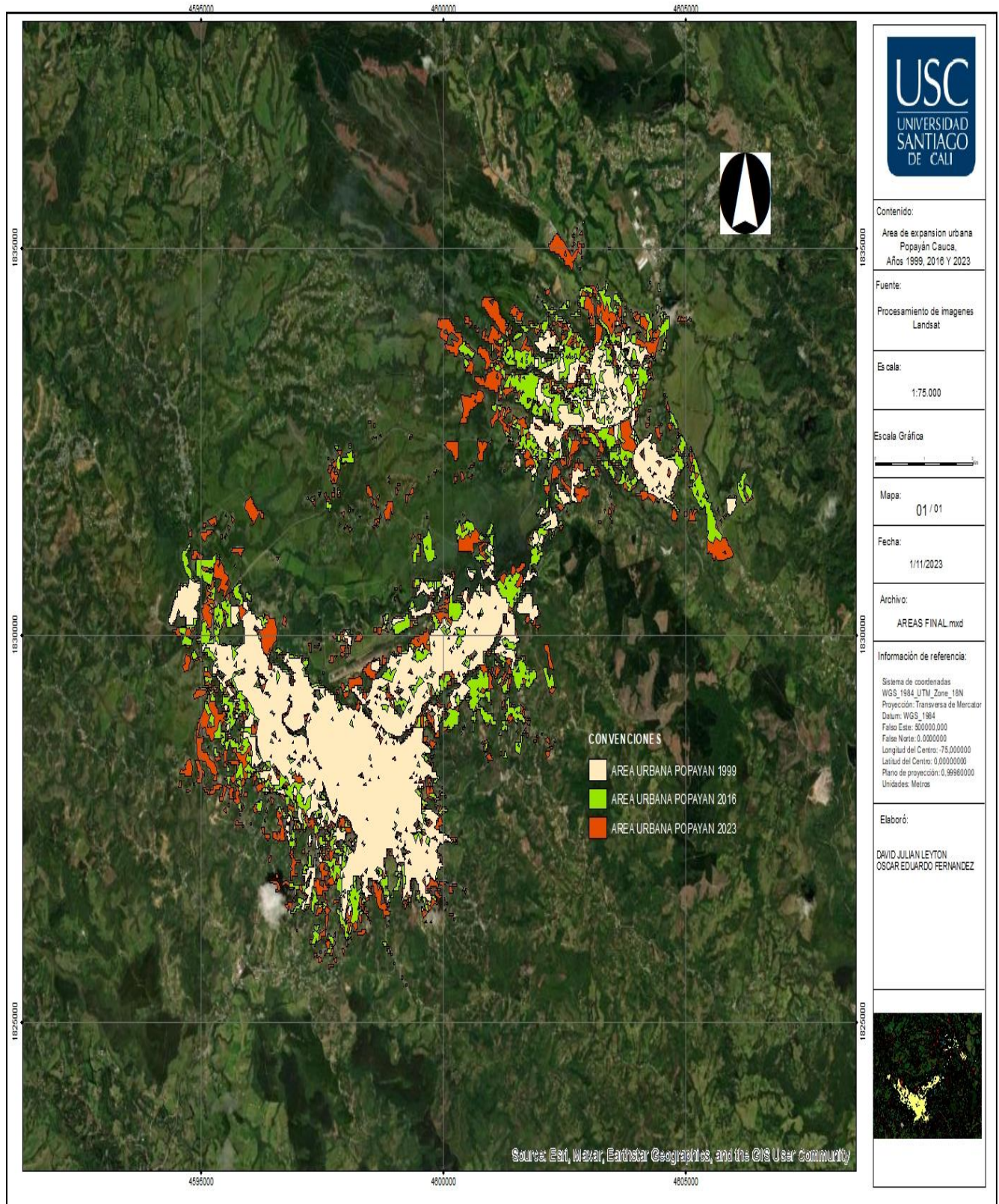
Fuente: Los Autores.

La tasa anual de cambio de cobertura para el casco urbano de Popayán, en el periodo de 1999 a 2016 es de 2.28% y en el periodo de 2016 al 2023 se tiene una tasa anual de cambio de cobertura de 4.4% siendo esta la más alta, indicando que durante este periodo de tiempo se dio una mayor expansión urbana en el territorio lo anterior se relaciona a un factor determinante como el desplazamiento forzado, que tuvo un incremento desde el año 2016, debido a la firma de los acuerdos de paz en Colombia (Arias, 2020), generando así a lo largo de los años la presencia de asentamientos ilegales en la periferia.

En la Ciudad tal como indica (Macuacé & Cortés, 2021) se ha observado un aumento considerable en los asentamientos, particularmente en la zona Suburbana del Municipio, lo que representa un crecimiento notable. Esta situación se da principalmente hacia las periferias, presentándose por razones como la falta de suficientes viviendas disponibles para satisfacer la demanda existente en la ciudad. Estos asentamientos han ido en aumento sobre los cerros tutelares, viéndose afectadas estas áreas que son consideradas como zonas de protección de acuerdo con el POT que precisa “Los cerros tutelares como grandes reguladores del crecimiento, libres de toda urbanización y perpetuados como

el telón de fondo de la Ciudad” (Popayán, 2002) y, por lo tanto, se deben preservar.

Figura 11. Área de expansión urbana de Popayán Cauca, entre los años 1999, 2016 y 2023, procesamiento de imágenes Landsat



Fuente: Los Autores.

Con la cartografía obtenida (figura 11), se observa el crecimiento de expansión urbana hacia las zonas de expansión propuestas en el POT del municipio, zona Nor-Oriente y Nor-Occidente, donde predominan proyectos de vivienda de alto costo lo que presenta una dificultad para el acceso a vivienda (Sinisterra, 2019).

En la figura 11, también se logra observar un crecimiento hacia las zonas Oriente, Sur-Occidente y Sur de la ciudad donde se presentan cambios en la dinámica del crecimiento viéndose afectados los cerros tutelares, lugares en los que ubican los asentamientos ilegales, llevando a la inclusión de zonas que se podrían considerar como cinturones suburbanos, a la dinámica propia de la expansión urbana (Macuacé & Cortés, 2021), asimismo en estas zonas se presentan factores como el bajo costo de la tierra, situación que alienta a los residentes de bajos ingresos a buscar otras formas de acceso a la vivienda, como comprar o invadir propiedades en lugares de difícil acceso (Macuacé & Cortes, 2013).

La delimitación de la ciudad con los cerros tutelares hacia el oriente presenta procesos de urbanización desorganizados, lo cual ha tenido un impacto negativo en el medio ambiente y el paisaje. La falta de conciencia sobre las zonas de ecosistema definidas ha llevado a una mayor vulnerabilidad en las áreas de riesgo y amenazas de deslizamientos de tierra. (Castillo, 2020).

Con los resultados obtenidos del procesamiento de las imágenes Landsat sobre la expansión urbana de Popayán, permite visualizar como se han generado los cambios en el crecimiento urbano en la ciudad desde el año 1999 hasta el 2023, además, aporta a que se continúen desarrollando análisis a través de información geográfica cuantitativa para la integración de otros indicadores que contribuyan a la actualización del Plan de Ordenamiento Territorial.

4. CONCLUSIONES

- El análisis multitemporal en el periodo 1999 a 2023 aplicado a el área urbana del municipio de Popayán Cauca permite observar cómo ha sido la expansión hacia las zonas Nor Oriental y Nor Occidental, áreas definidas como zonas de expansión en el Plan de Ordenamiento Territorial POT.
- De acuerdo con las zonas de expansión relacionadas en el POT se evidencia una expansión urbana en crecimiento hacia las zonas Oriental, Sur Occidental y Sur de la ciudad, presentándose cambios de uso del suelo de los cerros tutelares, donde se construyen asentamientos sin los permisos legales por falta de seguimiento de los entes de control.
- El monitoreo continuo de la expansión urbana utilizando técnicas de teledetección mediante el uso de imágenes satelitales es esencial para guiar un crecimiento planificado y sostenible en ciudades como Popayán, siendo de importancia al momento de realizar un análisis multitemporal, permitiendo identificar el cambio de las coberturas a través de diferentes años.
- La tasa anual de cambio de la superficie de la cubierta por diferentes coberturas, para la ciudad de Popayán fue mayor entre los años 2016 a 2023, de acuerdo con los resultados obtenidos de las imágenes Landsat utilizadas, debido a factores determinantes como son la migración por el desplazamiento forzado presentados en el departamento.
- La investigación realizada en este estudio demuestra la utilidad y relevancia de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) en el análisis de la expansión urbana en un entorno como la ciudad de Popayán, se observó un aumento significativo en la expansión de la ciudad, evidenciando una clara tendencia de crecimiento en la parte urbana. Esto se traduce en la transformación del uso del suelo, la fragmentación de hábitats naturales y la presión sobre los recursos naturales, lo que plantea desafíos significativos en términos de planificación y gestión urbana sostenible.

- Los diferentes softwares utilizados para el procesamiento de las imágenes Landsat requieren de un entrenamiento minucioso, ya que al realizar las clasificaciones supervisadas se pueden presentar áreas combinadas entre suelo urbano y suelo desnudo, generando así diferencias representativas en los resultados para cada imagen.

I. REFERENCIAS

- Alcaldía de Popayán. (25 de 09 de 2023). *Alcaldía de Popayán*. Recuperado el 25 de 09 de 2023, de <https://www.popayan.gov.co/MiMunicipio/Paginas/Nuestra-Geografia.aspx#gsc.tab=0>
- Alvarez, C. (2010). *Evolución de distancias para clasificadores basados en prototipos*. TESIS DE GRADO, UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID. Recuperado el 12 de 10 de 2023, de https://e-archivo.uc3m.es/bitstream/handle/10016/10365/PFC_Christian_Felipe_Alvarez.pdf
- Arias Henao, D. P. (2020). La implementación del acuerdo de paz y la transformación del conflicto armado en Colombia. *Revista Científica General José María Córdova*, 18(31), 565-584. Recuperado el 20 de 10 de 2023, de <https://www.redalyc.org/journal/4762/476268268006/476268268006.pdf>
- Castillo, Y. (2020). *FORMULACIÓN DE ESTRATEGIAS DE GESTIÓN AMBIENTAL PARA LOS CERROS TUTELARES LAS TRES CRUCES Y LA EME COMO INSUMO BASE PARA LA ACTUALIZACIÓN DEL COMPONENTE AMBIENTAL DEL PLAN DE ORDENAMIENTO TERRITORIAL DEL MUNICIPIO DE POPAYÁN, CAUCA - COLOMBIA*. Tesis de Grado, Corporación Universitaria Autónoma del Cauca., Cauca, Popayán. Recuperado el 10 de 10 de 2023, de <https://repositorio.uniautonoma.edu.co/bitstream/handle/123456789/286/T%20IA-P%20159%202020.pdf?sequence=1&isAllowed=y#:~:text=Los%20Cerros%20Tutelares%20son%20un,biodiversidad%20que%20se%20encuentra%20en>
- Chavez. (1996). Image-Based Atmospheric Corrections - Revisited and Improved. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 62, 1025-1036. Recuperado el 12 de 10 de 2023, de https://www.asprs.org/wp-content/uploads/pers/1996journal/sep/1996_sep_1025-1036.pdf
- Concepción., E. D. (2022). Expansión urbana o cómo el suelo urbanizado se dispersa por el paisaje: Implicaciones para la conservación de la biodiversidad. *Revista Ecosistemas*, Vol. 31 Núm. 1: Ecología Urbana: Una disciplina en auge. doi:<https://doi.org/10.7818/ECOS.2165>
- Congedo, L. (2017). *Semi-Automatic Classification Plugin Documentation Versión 5.3.6.1*. Recuperado el 01 de 10 de 2023, de https://semiautomaticclassificationmanual-v5.readthedocs.io/_/downloads/es/latest/pdf/
- Congedo, L. (2023). *QGIS Python Plugins Repository*. Recuperado el 01 de 10 de 2023, de <https://plugins.qgis.org/plugins/SemiAutomaticClassificationPlugin/>
- García, L., & et al. (2020). Aplicación de sensores remotos para el análisis de cobertura vegetal y cuerpos de agua. *IDESIA (Chile)*, Volumen 38(4), 99-107. Obtenido de <https://www.scielo.cl/pdf/idesia/v38n4/0718-3429-idesia-38-04-99.pdf>
- Humacata, L. (2020). *Sistemas de Información Geográfica. Aplicaciones para el análisis de clasificación espacial y cambios de usos del suelo*. (Primera edición. ed.). Buenos Aires, Argentina: Impresiones Buenos Aires Editorial. Recuperado el 2023 de 10 de 10, de <https://drive.google.com/file/d/1ZmBUOVsJRVBc4hfBUsqCNjSzm05RY8v4/view>
- IDEAM. (2017). *Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales*. Recuperado el 12 de 10 de 2023, de <http://www.ideam.gov.co/documents/11769/48213633/6.05+HM+Tasa+cambio+coberturas.pdf/193b0990-add9-427c-bd8a-a9690eab2b78>
- López Castrillon; Juan Carlos. (2020). *Plan de Desarrollo Municipal "Creo en Popayán" 2020 – 2023*. Alcaldía de Popayán, Cauca, Popayan. Recuperado el 2023, de <https://www.popayan.gov.co/NuestraAlcaldia/Paginas/Plan-de-Desarrollo-Municipal-2020-%E2%80%93-2023.aspx#gsc.tab=0>

- Macuacé, R. A., & Cortés, R. (2021). *La Dinámica de la Población y el Crecimiento Urbano en Popayán: un análisis comparativo 1985-2018* (Vol. Primera Edición). Bogota DC: ESCUELA SUPERIOR DE ADMINISTRACIÓN PÚBLICA. Recuperado el 12 de 10 de 2023, de <https://repositoriodcim.esap.edu.co/bitstream/handle/123456789/25396/La%20Din%c3%a1mica%20de%20la%20poblaci%c3%b3n%20digital%2024012022.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Macuacé, R., & Cortes, R. (2013). Sobre migración y rururbanidad: adaptación y transformación de la ciudad de Popayán a comienzos del siglo XXI. *Territorios*(29), 117-142. Recuperado el 16 de 10 de 2023, de <https://www.redalyc.org/pdf/357/35729989008.pdf>
- MERA, P. D. (2016). *ANÁLISIS MULTITEMPORAL DEL CRECIMIENTO URBANO EN LA CIUDAD DE POPAYÁN EN EL DEPARTAMENTO DEL CAUCA, AÑOS DE 1960 A 2015*. Tesis de grado, UNIVERSIDAD SANTO TOMAS, Bogotá DC. Recuperado el 2023 de 10 de 10, de <https://repository.usta.edu.co/bitstream/handle/11634/2310/2016dianamera.pdf?sequence=4&isAllowed=y>
- Niño, Y. M. (2020). “*ANÁLISIS MULTITEMPORAL MEDIANTE IMÁGENES DE SENSORES REMOTOS PARA LA DETERMINACIÓN DE LOS CAMBIOS DE USO DE SUELO EN EL MUNICIPIO DE SAN FRANCISCO DE SALES, CUNDINAMARCA (COLOMBIA) ENTRE LOS AÑOS 90’S Y 2018*”. Tesis de Maestría, Universidad Nacional de La Plata, La Plata. Recuperado el 10 de 10 de 2023, de http://sedici.unlp.edu.ar/bitstream/handle/10915/111198/Documento_completo.pdf-PDFA.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Popayán, A. d. (2002). *Plan de Ordenamiento Territorial para el Municipio de Popayán*. Cauca, Popayán. Recuperado el 10 de 10 de 2023, de https://www.popayan.gov.co/NuestraAlcaldia/PublishingImages/Paginas/Plan-de-ordenamiento-territorial/acuerdo_06_2002_normas_POT.pdf
- Ríos Sánchez, K. I. (2021). Expansión urbana descontrolada: ¿Qué pasará con el agua? *Boletín Científico De Ciencias Básicas E Ingenierías Del ICBI*, 54-59. doi:<https://doi.org/10.29057/icbi.v8i16.5778>
- Rosero, M. (2018). *Análisis multitemporal del uso del suelo y cobertura vegetal de la cuenca del Río Tabuando y proyección de cambios al año 2031, en el cantón Ibarra, provincia de Imbabura*. Trabajo de Investigación previo a la obtención del Título de Magíster en Gestión, UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE, IBARRA. Recuperado el 2023, de <http://repositorio.utn.edu.ec/handle/123456789/7745>
- Sinisterra, M. M. (2019). Ciudades Intermedias y Desigualdades Urbanas: Un Estudio de Caso sobre Determinantes Socioeconómicos de la Tenencia de Vivienda. *Asociación Latinoamericana de Ciencia Política*, 25. Recuperado el 10 de 16 de 2023, de <https://alacip.org/cong19/277-sinisterra-19.pdf>
- Triana, C. A. (2023). *Análisis multitemporal de la expansión urbana en el municipio de Zipaquirá, Cundinamarca en el periodo 1991-2022*. Tesis de grado, Bogota. Recuperado el 10 de 10 de 2023, de <http://repositorio.uan.edu.co/handle/123456789/7808>
- USGS. (2023). *United States Geological Survey*. Recuperado el 25 de 09 de 2023, de <https://www.usgs.gov/landsat-missions>
- Zabala, A. (2019). *Prácticas de Métodos Estadísticos, Máster Universitario en Teledetección y Sistemas de Información Geográfica*. Universidad Autonoma de Barcelona, Centro de Investigación Ecológica y Aplicaciones Forestales. Recuperado el 01 de 10 de 2023, de http://www.creaf.uab.es/master/Intranet/MaterialsProfessors/MetodesEstadistics/AlaitzZabala/Practiques_sesio_1/MetodesEstadistics_3a_part_2019_20_es.pdf