



**Análisis multitemporal comparativo de la expansión urbana (1984-2025) en el valle de
Aburrá y el Altiplano del Oriente Antioqueño**

Expansión urbana AOA–AMVA 1984–2025 [LUMACHain]

Manolo Gallo Holguín

Monografía presentada para optar al título de Especialista en Medio Ambiente y Geoinformática

Asesor

Juan José García Duque, Magíster (MSc) en Ingeniería

Universidad de Antioquia

Facultad de Ingeniería

Especialización en Medio Ambiente y Geoinformática

Medellín, Antioquia, Colombia

2025

**ANÁLISIS MULTITEMPORAL COMPARATIVO DE LA EXPANSIÓN URBANA (1984-2025)
EN EL VALLE DE ABURRÁ Y EL ALTIPLANO DEL ORIENTE ANTIOQUEÑO**

Cita	(Gallo Holguín, 2025)
Referencia Estilo APA 7 (2020)	Gallo Holguín, M. (2025). <i>Análisis multitemporal comparativo de la expansión urbana (1984–2025): En el Valle de Aburrá y el Altiplano del Oriente Antioqueño</i> [Monografía de posgrado]. Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia.



Especialización en Medio Ambiente y Geoinformática, Cohorte XX.



Repositorio Institucional: <http://bibliotecadigital.udea.edu.co> Universidad de Antioquia -
www.udea.edu.co

Rector: John Jairo Arboleda.

El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Antioquia ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por los derechos de autor y conexos.

ANÁLISIS MULTITEMPORAL COMPARATIVO DE LA EXPANSIÓN URBANA (1984-2025) EN EL VALLE DE ABURRÁ Y EL ALTIPLANO DEL ORIENTE ANTIOQUEÑO

Dedicatoria

A mis padres, Agustín y Cecilia, por la vida, por sus valores inquebrantables y por el apoyo incondicional que ha sido el pilar de cada uno de mis sueños. Su sacrificio y ejemplo son la fuente de mi perseverancia.

A mi amada esposa, Jessica, por ser mi refugio, mi motivación y mi fuerza diaria. Tu paciencia, amor y soporte incondicional han hecho posible este camino, convirtiendo cada desafío en una victoria compartida.

Agradecimientos

Mi sincero agradecimiento a la Universidad de Antioquia, por abrirme las puertas a la excelencia académica y por brindarme una experiencia de posgrado tan enriquecedora.

Extiendo mi gratitud a mis docentes y asesores, cuya sabiduría, guía experta y exigencia metodológica fueron cruciales para el rigor de esta investigación. Su calidad humana y profesional hicieron de este proceso un verdadero aprendizaje.

A mis compañeros de estudio, por las jornadas compartidas y la colaboración constante; su camaradería hizo más grata esta travesía.

Finalmente, un reconocimiento profundo a la Fundación Néstor Sanín, cuyo apoyo ha sido fundamental para hacer posible la culminación exitosa de este proyecto académico. Su confianza ha trascendido el ámbito económico, permitiendo materializar este importante logro profesional.

**ANÁLISIS MULTITEMPORAL COMPARATIVO DE LA EXPANSIÓN URBANA (1984-2025)
EN EL VALLE DE ABURRÁ Y EL ALTIPLANO DEL ORIENTE ANTIOQUEÑO**

CONTENIDO

Índice Imágenes	6
Índice de tablas	6
Índice de gráficas	7
Estructura general del documento	9
1. Introducción	10
1.1. Contextualización del territorio y problemáticas de la expansión urbana acelerada	10
1.2. Planteamiento del problema	12
1.3. Preguntas de investigación	13
1.4. Objetivo general	13
1.5. Objetivos específicos	13
1.6. Justificación	14
1.7. Alcance, delimitación espacial y temporal del estudio	15
2. Marco conceptual y referencial	16
2.1. Urbanización y expansión urbana: enfoques teóricos y empíricos	16
2.2. Dinámica territorial del Valle de Aburrá y del Altiplano del Oriente Antioqueño	18
2.3. Teledetección y análisis multitemporal en estudios urbanos	23
2.4. Modelos y metodologías para detección de cambios y predicción espacial	25
2.4.1 Detección de cambios (retrospectiva)	25
2.4.2 Pertinencia para AMVA y AOA	26
2.5. Revisión de estudios comparativos (Global, Latinoamérica y Colombia)	26
2.5.1 Estudios globales	26
2.5.2 Estudios en Latinoamérica	27
2.5.3 Estudios en Colombia	27
2.5.4 Síntesis aplicable a AMVA–AOA	29
2.6. Marco normativo y de ordenamiento territorial	29
3. Marco metodológico	31
3.1. Enfoque de investigación y tipo de estudio (aplicado, descriptivo, espacial)	31
3.2. Área de estudio (Valle de Aburrá y Altiplano del Oriente Antioqueño): ubicación, extensión y características físicas	32
3.3. Diseño general del modelo metodológico	33
3.4. Fuentes de información y datos empleados	39
4. Resultados	40
4.1. Resultados generales del modelo	40

ANÁLISIS MULTITEMPORAL COMPARATIVO DE LA EXPANSIÓN URBANA (1984-2025) EN EL VALLE DE ABURRÁ Y EL ALTIPLANO DEL ORIENTE ANTIOQUEÑO

4.1.1. Generación y descarga de información base.....	40
4.1.2. Generación de índices normalizados	42
4.1.3. Reglas de clasificación supervisada (Random Forest).....	43
4.2. Cobertura urbana histórica (1984–2025), resumen de la trayectoria general del crecimiento urbano.	44
4.2.1. Indicador de ocupación urbana (2023–2025)	49
4.3. Tendencias de cambio y tasas de crecimiento urbano	50
4.3.1. AMVA	50
4.3.2 Intensidad de cambio urbano 1986–2025 (AMVA)	52
4.3.3. AOA.....	53
4.3.4 Intensidad de cambio urbano 1986–2025 (AOA).....	55
4.4. Identificación de núcleos y corredores de expansión AOI general (AMVA + AOA).....	57
4.5. Evaluación metodológica comparativa (eficiencia, replicabilidad y desempeño).....	58
4.5.1 Criterios de evaluación.....	58
4.5.2 Síntesis comparativa del enfoque	59
4.5.3 Eficiencia operativa.....	59
4.5.4 Replicabilidad	59
4.5.5 Desempeño cartográfico.....	60
4.5.6 Riesgos de sesgo y mitigaciones	60
4.6 Potencial de urbanización	61
4.7 Mapa de conflicto Urbano Pendiente	64
4.8 Validación y calidad del clasificador	66
5. Discusión de Resultados e Implicaciones.....	67
5.1. Contraste de las Dinámicas de Expansión Urbana (1984–2025).....	67
5.2. Factores Impulsores (Drivers) de los Patrones Espaciales.....	68
5.2.1. Factores Físicos y Topográficos	68
5.2.2. Factores de Conectividad e Infraestructura	68
5.2.3. Implicaciones Regulatorias (POT/PBOT)	69
5.3. Alcances, Aportes y Limitaciones del Model LUMACHain.....	69
5.3.1. Aportes Metodológicos	69
5.3.2. Limitaciones del Estudio.....	70
5.4. Conclusiones para la Gestión Territorial	70
6. Conclusiones.....	71
7. Referencias bibliográficas.....	72

**ANÁLISIS MULTITEMPORAL COMPARATIVO DE LA EXPANSIÓN URBANA (1984-2025)
EN EL VALLE DE ABURRÁ Y EL ALTIPLANO DEL ORIENTE ANTIOQUEÑO**

8. Anexos..... 75

Índice Imágenes

Imagen 1. Ubicación del área de estudio_ Elaboración propia ArcGISPro. 19
 Imagen 2. Localización del área de estudio_ Elaboración propia ArcGISPro. 20
 Imagen 3. Esquema gráfico del Model_LUMACHain_ Elaboración propia ArcGISPro. 38
 Imagen 4. Representación gráfica serie de satélites LandSat _ Elaboración propia IA. 39
 Imagen 5. Representación gráfica misión SRTM _ Elaboración propia IA..... 40
 Imagen 6. Resultados fase 1. Composición de multibandas_Multianules_ Elaboración propia ArcGISPro y entornos Python. 42
 Imagen 7. Resultados fase 2 y 3. Composición de multibandas_IndicesNormalizados y parametrización de entornos de clasificación supervisada Random forest_ Elaboración propia ArcGISPro y entornos Python. 43
 Imagen 8. Resultados fase 4 clasificación supervisada Random forest_ Procesamiento y binarización Urbano/NoUrbano_ Elaboración propia ArcGISPro y entornos Python. 44
 Imagen 9. Huella urbana binaria (Urbano/No Urbano) para (a) AMVA y (b) AOA en cinco periodos: 1984–1986, 1996–1998, 2002–2004, 2011–2013 y 2023–2025. Base Landsat SR (30 m). Elaboración propia ArcGISPro y entornos Python..... 47
 Imagen 10. Comparación huellas urbanas AMVA 1986 - 2025_ ArcGISPro y entornos Python..... 50
 Imagen 11. Modelo de intensidad de cambio AMVA periodo 1986 - 2025_ ArcGISPro y entornos Python. 52
 Imagen 12. Comparación huellas urbanas AOA 1986 - 2025_ ArcGISPro y entornos Python. 54
 Imagen 13. Modelo de intensidad de cambio AOA periodo 1986 - 2025_ ArcGISPro y entornos Python. 55
 Imagen 14. Modelo de densidad de Kernel aplicada al modelo de intensidad de cambio AOI_ Total_ periodo 1986 - 2025_ ArcGISPro y entornos Python..... 58
 Imagen 15. Modelo de adecuabilidad énfasis en áreas susceptibles a densificación urbana AOI_ Total periodo 1986 - 2025_ ArcGISPro y entornos Python..... 62
 Imagen 16. Modelo de conflicto pendiente - urbano_ AOA_ Total año 2025_ ArcGISPro y entornos Python. 65

Índice de tablas

Tabla 1. Distribución de áreas por AOI_ Elaboración propia ArcGISPro; Excel; Entornos Python. 21
 Tabla 2. Áreas totales por AOI_ Elaboración propia ArcGISPro; Excel; Entornos Python. 22
 Tabla 3. Resumen de estudios comparativos_ Elaboración propia Excel; Entornos Python. 28
 Tabla 4. Resumen Reglas adaptativas y umbrales de Clasificación Elaboración propia ArcGISPro; Excel; Entornos Python..... 45

**ANÁLISIS MULTITEMPORAL COMPARATIVO DE LA EXPANSIÓN URBANA (1984-2025)
EN EL VALLE DE ABURRÁ Y EL ALTIPLANO DEL ORIENTE ANTIOQUEÑO**

Tabla 5. Resumen resultados Fase 5_ Estadísticas zonales AOA_ Elaboración propia ArcGISPro; Excel; Entornos Python.....	48
Tabla 6. Resultados Modelo de Ocupación por AOI_ Elaboración propia ArcGISPro; Excel; Entornos Python.....	49
Tabla 7. Resultados Modelo de intensidad de cambio urbano AMVA_ Elaboración propia ArcGISPro; Excel; Entornos Python.....	51
Tabla 8. Resultados Modelo de intensidad de cambio urbano AOA_ Elaboración propia ArcGISPro; Excel; Entornos Python.....	54
Tabla 9. Resultados Modelo de Adecuabilidad de zonas susceptibles a urbanizar_ AOI_ Total_ Elaboración propia ArcGISPro; Excel; Entornos Python.....	63
Tabla 10. Validación y calidad del modelo clasificador aplicado por periodo_ Elaboración propia ArcGISPro; Excel; Entornos Python.....	66
Tabla 11. Validación y calidad del modelo clasificador aplicado por fuente_ Elaboración propia ArcGISPro; Excel; Entornos Python.....	66
Tabla 12. Resultados Fase 5_ Estadísticas zonales AMVA_ Elaboración propia ArcGISPro; Excel; Entornos Python.....	75
Tabla 13. Resultados Fase 5_ Estadísticas zonales AOA_ Elaboración propia ArcGISPro; Excel; Entornos Python.....	78
Tabla 14. Resultados Fase Validación del clasificador_ AOI_ Total_ Elaboración propia ArcGISPro; Excel; Entornos Python.....	83

Índice de gráficas

Gráfica 1. Áreas por municipio AOI_ Total_ Elaboración propia ArcGISPro; Excel; Entornos Python.....	22
Gráfica 2. Distribución de áreas por municipio AOA_ Elaboración propia ArcGISPro; Excel; Entornos Python.....	22
Gráfica 3. Distribución de áreas por municipio AMVA_ Elaboración propia ArcGISPro; Excel; Entornos Python.....	22
Gráfica 4. Áreas totales urbanas por periodo_ AMVA_ Elaboración propia ArcGISPro; Excel; Entornos Python.....	46
Gráfica 5. Áreas totales urbanas por periodo_ AOA_ Elaboración propia ArcGISPro; Excel; Entornos Python.....	48
Gráfica 6. Modelo de ocupación por AOI_ Elaboración propia ArcGISPro; Excel; Entornos Python.....	49

**ANÁLISIS MULTITEMPORAL COMPARATIVO DE LA EXPANSIÓN URBANA (1984-2025)
EN EL VALLE DE ABURRÁ Y EL ALTIPLANO DEL ORIENTE ANTIOQUEÑO**

Gráfica 7. Delta de cambio interperiodo_ AMVA_ Elaboración propia ArcGISPro; Excel; Entornos Python. 53

Gráfica 8. Delta de cambio interperiodo_ AOA_ Elaboración propia ArcGISPro; Excel; Entornos Python. 56

Gráfica 9. Distribución de las áreas susceptibles a densificación urbana_ AOI_ Total_ Elaboración propia ArcGISPro; Excel; Entornos Python. 63

Resumen

Este estudio analiza la dinámica multitemporal de la expansión urbana (1984–2025) en el Valle de Aburrá (AMVA) y el Altiplano del Oriente Antioqueño (AOA) mediante el desarrollo y aplicación del Modelo LUMACHain. Utilizando Machine Learning (Random Forest) sobre series Landsat en Google Earth Engine, se logró la reconstrucción histórica de la huella urbana con alta precisión (OA=96.6%). Los resultados revelan trayectorias divergentes: el AMVA exhibe densificación y coalescencia por restricciones físicas, mientras que el AOA muestra una expansión policéntrica dispersa impulsada por la conectividad vial. La evaluación del conflicto de uso del suelo evidencia una desconexión crítica entre la tendencia inercial del crecimiento y los determinantes de aptitud, proveyendo insumos valiosos para la gestión ambiental y la planificación territorial.

Abstract

This study analyzes the multitemporal dynamics of urban expansion (1984–2025) in the Aburrá Valley (AMVA) and the Eastern Antioquia Plateau (AOA) through the development and application of the LUMACHain Model. Utilizing Machine Learning (Random Forest) on Landsat series within Google Earth Engine, the historical reconstruction of the urban footprint was achieved with high accuracy (OA=96.6%). The results reveal divergent trajectories: the AMVA exhibits densification and coalescence due to physical constraints, while the AOA shows a dispersed polycentric expansion driven by road connectivity. The evaluation of land-use conflict highlights a critical disconnect between the inertial growth trend and the land suitability determinants, providing valuable input for environmental management and territorial planning.

ANÁLISIS MULTITEMPORAL COMPARATIVO DE LA EXPANSIÓN URBANA (1984-2025) EN EL VALLE DE ABURRÁ Y EL ALTIPLANO DEL ORIENTE ANTIOQUEÑO

Estructura general del documento

El presente trabajo se organiza en seis capítulos principales, cada uno orientado a desarrollar de manera secuencial los componentes conceptuales, metodológicos y analíticos de la investigación.

El Capítulo 1 – Introducción presenta la contextualización del territorio y la problemática de la expansión urbana acelerada, así como la formulación del problema, los objetivos, la justificación, el alcance y la delimitación del estudio. Este capítulo establece el marco conceptual inicial que sustenta la relevancia del análisis territorial propuesto.

El Capítulo 2 – Marco conceptual y referencial desarrolla los fundamentos teóricos y antecedentes que sustentan la investigación. En él se abordan los principales enfoques sobre urbanización y expansión urbana, la dinámica territorial del Oriente Antioqueño, los aportes de la teledetección y los modelos de análisis multitemporal aplicados a estudios urbanos, además de una revisión del marco normativo relacionado con el ordenamiento territorial y la gestión ambiental.

El Capítulo 3 – Marco metodológico describe el diseño del estudio, las fuentes de información utilizadas, los procedimientos de procesamiento y análisis de las imágenes satelitales, el cálculo de índices espectrales, la clasificación de coberturas y la comparación multitemporal. También presenta la fase de proyección del crecimiento urbano y los criterios de validación aplicados para garantizar la consistencia de los resultados.

El Capítulo 4 – Resultados expone los hallazgos principales del análisis multitemporal, la caracterización del crecimiento urbano y las tendencias espaciales observadas en ambos territorios. Incluye las comparaciones entre periodos, las tasas de expansión, la identificación de núcleos urbanos y corredores de crecimiento, así como las proyecciones hacia horizontes futuros.

El Capítulo 5 – Discusión interpreta los resultados a la luz del marco teórico y de los contextos territoriales específicos. Se analizan los factores que impulsan la expansión urbana, las

ANÁLISIS MULTITEMPORAL COMPARATIVO DE LA EXPANSIÓN URBANA (1984-2025) EN EL VALLE DE ABURRÁ Y EL ALTIPLANO DEL ORIENTE ANTIOQUEÑO

implicaciones ambientales y sociales derivadas del proceso, y las diferencias entre las trayectorias de desarrollo del Valle de Aburrá y el Altiplano del Oriente Antioqueño.

Finalmente, el Capítulo 6 – Conclusiones y recomendaciones sintetiza los aportes centrales del estudio, resalta las implicaciones del análisis para la planificación territorial y la gestión ambiental, y propone orientaciones para futuras investigaciones o aplicaciones metodológicas en otros contextos regionales del país.

1. Introducción

1.1. Contextualización del territorio y problemáticas de la expansión urbana acelerada

Durante las últimas décadas, Colombia ha experimentado una acelerada transformación territorial impulsada por la expansión urbana, la movilidad poblacional y la concentración económica en sus principales áreas metropolitanas. En Antioquia, el Valle de Aburrá (AMVA) y el Altiplano del Oriente Antioqueño (AOA) ilustran con nitidez las tensiones entre crecimiento, sostenibilidad ambiental y capacidad de planificación del territorio (DNP, 2022) (CEPAL, 2019).

El Valle de Aburrá, eje metropolitano conformado por diez municipios con liderazgo de Medellín, presenta alta densidad urbana, fuerte concentración industrial y un proceso histórico de conurbación que ha diluido límites administrativos entre municipios contiguos (Área Metropolitana del Valle de Aburrá, 2020). Su morfología estrecha y longitudinal, encajada en la cordillera Central, ha condicionado una expansión predominantemente lineal, limitada por la topografía y apalancada por infraestructura vial, transporte masivo y oferta de servicios urbanos (Agudelo, 2018). A nivel socioeconómico, el AMVA concentra altos niveles de desarrollo humano y actúa como núcleo económico, educativo y cultural de la región andina antioqueña; no obstante, dicha centralización genera desequilibrios territoriales, presión sobre ecosistemas de ladera y una creciente huella urbana que compromete la sostenibilidad ambiental (AMVA, 2021) (Gobernación de Antioquia, 2021).

ANÁLISIS MULTITEMPORAL COMPARATIVO DE LA EXPANSIÓN URBANA (1984-2025) EN EL VALLE DE ABURRÁ Y EL ALTIPLANO DEL ORIENTE ANTIOQUEÑO

En contraste, el Altiplano del Oriente Antioqueño o Valle de San Nicolás pasó en las últimas tres décadas de un perfil predominantemente rural a convertirse en polo de expansión residencial, industrial y turística vinculado funcionalmente al área metropolitana (CORNARE, 2022). Su localización estratégica, la presencia del aeropuerto José María Córdova, la conectividad vial con Medellín y la disponibilidad relativa de suelo plano lo han convertido en receptor natural del crecimiento urbano y demográfico (Rojas & Muñoz, 2020). Municipios como Rionegro, La Ceja, El Carmen de Viboral, Marinilla, Guarne y El Retiro exhiben tasas de urbanización superiores al promedio departamental, configurando un corredor de desarrollo en rápida transformación con impactos sobre ecosistemas agrícolas y forestales (Gobernación de Antioquia, 2021).

Ambas regiones conforman un sistema urbano interdependiente, donde los flujos de población, empleo y servicios producen una dinámica metropolitana extendida que trasciende límites administrativos (Echeverri, 2019). Esta proximidad funcional plantea un desafío analítico y metodológico: comprender la expansión urbana no como fenómeno local aislado, sino como proceso en escalas influido por condiciones ambientales, socioeconómicas y de accesibilidad (González et al., 2021).

Frente a ese reto, la presente monografía desarrolla y valida un enfoque espacial replicable para evaluar multitemporalmente la expansión urbana, aplicado simultáneamente a dos unidades territoriales con rasgos contrastantes pero complementarios: el AMVA y el AOA. El enfoque integra herramientas de teledetección, análisis geoespacial y procedimientos reproducibles para comparar patrones, tasas y direcciones de expansión entre áreas metropolitanas consolidadas y territorios en proceso de transición (Jaramillo, 2020).

Así, el trabajo no solo describe la evolución territorial de ambas regiones; también propone una base técnica replicable que facilite a entidades territoriales y ambientales la toma de decisiones informada por evidencia espacial frente a los retos de urbanización sostenible y ordenamiento del territorio (CORNARE, 2022; AMVA, 2021).

ANÁLISIS MULTITEMPORAL COMPARATIVO DE LA EXPANSIÓN URBANA (1984-2025) EN EL VALLE DE ABURRÁ Y EL ALTIPLANO DEL ORIENTE ANTIOQUEÑO

1.2. Planteamiento del problema

La expansión urbana descontrolada se ha consolidado como una de las problemáticas territoriales más críticas del siglo XXI, al generar profundas transformaciones en los ecosistemas, en la estructura productiva del suelo y en la calidad de vida de las poblaciones (ONU-Hábitat, 2020). Este fenómeno, caracterizado por la ocupación acelerada y continua de áreas rurales o ambientalmente sensibles, ha derivado en procesos de densificación, fragmentación del territorio y pérdida progresiva de servicios ecosistémicos esenciales. En Colombia, estas dinámicas se manifiestan con especial intensidad en las regiones metropolitanas, donde la presión demográfica y la concentración económica impulsan un crecimiento urbano que en muchos casos desborda la capacidad de sostenibilidad del entorno natural (ONU-Hábitat, 2020) o (Zhu & Woodcock, 2014).

En el departamento de Antioquia, el Área Metropolitana del Valle de Aburrá (AMVA) y el Altiplano del Oriente Antioqueño (AOA) representan dos escenarios contrastantes pero interconectados de dicha problemática. En el Valle de Aburrá, el proceso histórico de urbanización ha alcanzado un alto grado de consolidación, con densificación de laderas, reducción de áreas verdes y una huella urbana que se expande hacia las cuencas altas y zonas de reserva (AMVA, 2021). Mientras tanto, en el Altiplano del Oriente, la urbanización avanza con rapidez sobre suelos agrícolas y ecosistemas estratégicos, impulsada por la expansión residencial, industrial y de servicios vinculada a la cercanía con Medellín (CORNARE, 2022).

El crecimiento simultáneo de ambas regiones evidencia una dinámica metropolitana extendida, donde la presión por el suelo urbano compromete recursos fundamentales como el agua, los suelos fértiles y la cobertura vegetal. Este proceso conlleva riesgos para la seguridad alimentaria e hídrica, la conectividad ecológica y la capacidad de resiliencia ambiental del territorio (Gobernación de Antioquia, 2021). Las tasas de expansión superan los mecanismos de regulación territorial, generando conflictos de uso del suelo y tensiones entre la conservación ambiental y el desarrollo urbano (CORNARE, 2022) (DNP, 2022).

Comprender la magnitud y dirección de este crecimiento resulta fundamental para anticipar sus impactos y orientar estrategias de ordenamiento más sostenibles. En este sentido, analizar la expansión urbana del AMVA y del AOA desde una perspectiva geoespacial y multitemporal

ANÁLISIS MULTITEMPORAL COMPARATIVO DE LA EXPANSIÓN URBANA (1984-2025) EN EL VALLE DE ABURRÁ Y EL ALTIPLANO DEL ORIENTE ANTIOQUEÑO

permite evidenciar los patrones de transformación que caracterizan la actual configuración del territorio y sus posibles trayectorias futuras. Así, el problema central de este estudio radica en la expansión urbana acelerada, descontrolada y ambientalmente conflictiva, cuyas consecuencias se reflejan en la degradación de los ecosistemas, la pérdida de servicios ambientales y el desequilibrio en la relación entre ciudad y naturaleza.

1.3. Preguntas de investigación

1 ¿Cómo ha evolucionado la expansión urbana en el Valle de Aburrá y el Altiplano del Oriente Antioqueño durante las últimas décadas, y qué características definen su dinámica territorial actual?

2 ¿Qué impactos territoriales ha generado la expansión urbana acelerada sobre los ecosistemas, los suelos agrícolas y la disponibilidad hídrica en ambas regiones?

1.4 Objetivo general

Analizar la dinámica multitemporal de la expansión urbana en el Valle de Aburrá y el Altiplano del Oriente Antioqueño entre 1984 y 2025, identificando sus patrones espaciales, sus principales impactos territoriales y las tendencias de crecimiento que permitan comprender la evolución espacial del desarrollo urbano sostenible.

1.5 Objetivos específicos

- ✓ Caracterizar la evolución histórica del proceso de expansión urbana en ambas regiones mediante el análisis comparativo de coberturas y cambios de uso del suelo en distintos periodos.
- ✓ Identificar los patrones espaciales y morfológicos del crecimiento urbano, diferenciando procesos de densificación, dispersión y consolidación de núcleos metropolitanos.
- ✓ Comparar las dinámicas de ambas regiones para comprender sus diferencias y similitudes en cuanto a forma, intensidad y ritmo de urbanización, considerando su relación funcional y su contexto regional.

ANÁLISIS MULTITEMPORAL COMPARATIVO DE LA EXPANSIÓN URBANA (1984-2025) EN EL VALLE DE ABURRÁ Y EL ALTIPLANO DEL ORIENTE ANTIOQUEÑO

1.6. Justificación

El crecimiento urbano constituye uno de los procesos más influyentes en la transformación reciente del territorio antioqueño. La consolidación de áreas metropolitanas, la expansión hacia zonas rurales y la ocupación de espacios ambientalmente sensibles han redefinido la estructura espacial del departamento, modificando la relación entre ciudad, ecosistema y productividad del suelo. Comprender estas transformaciones resulta esencial para anticipar los desafíos que enfrentan las regiones en términos de sostenibilidad, seguridad alimentaria e hídrica, y equilibrio ambiental (Gobernación de Antioquia, 2021).

El Valle de Aburrá y el Altiplano del Oriente Antioqueño representan dos realidades contrastantes, pero profundamente vinculadas. Mientras el primero evidencia procesos de densificación, verticalización y consolidación metropolitana, el segundo experimenta una expansión dispersa y acelerada impulsada por la conectividad y la presión del desarrollo inmobiliario. Analizar ambos territorios de manera conjunta permite observar cómo la urbanización ha evolucionado desde dos perspectivas complementarias: la de un sistema urbano consolidado y la de una región en transición hacia la urbanización intensiva.

El estudio cobra relevancia al abordar la expansión urbana desde una visión multitemporal y espacialmente comparativa, sustentada en el uso de tecnologías geoespaciales y de teledetección que permiten reconstruir la evolución territorial de las últimas cuatro décadas. Este enfoque posibilita cuantificar de manera objetiva los patrones de crecimiento, identificar zonas críticas de transformación y generar aproximaciones prospectivas que sirvan como base técnica para futuras decisiones de planificación y gestión ambiental.

Más allá de su valor analítico, la investigación aporta a la comprensión del territorio como un sistema dinámico, en el que los procesos de urbanización influyen directamente sobre la funcionalidad ecológica y la disponibilidad de recursos. Al evidenciar las consecuencias de la expansión descontrolada sobre la cobertura vegetal, los suelos productivos y las fuentes de agua, el estudio contribuye a fortalecer una mirada integral del desarrollo urbano y a promover estrategias orientadas hacia la sostenibilidad regional.

ANÁLISIS MULTITEMPORAL COMPARATIVO DE LA EXPANSIÓN URBANA (1984-2025) EN EL VALLE DE ABURRÁ Y EL ALTIPLANO DEL ORIENTE ANTIOQUEÑO

En síntesis, este trabajo se justifica por su capacidad para explicar la evolución y anticipar la dirección del crecimiento urbano en Antioquia, aportando una base empírica sólida que respalde la toma de decisiones fundamentadas, la formulación de políticas territoriales coherentes y la reflexión académica sobre los procesos de transformación del paisaje metropolitano.

1.7. Alcance, delimitación espacial y temporal del estudio

El presente estudio tiene un alcance analítico, descriptivo y comparativo, orientado a evaluar los patrones de expansión urbana en dos regiones clave del departamento de Antioquia: el Área Metropolitana del Valle de Aburrá (AMVA) y el Altiplano del Oriente Antioqueño (AOA). Su propósito no es establecer lineamientos normativos de ordenamiento territorial, sino analizar y caracterizar la evolución del crecimiento urbano, sus tendencias espaciales y sus implicaciones sobre el territorio y el ambiente.

En el plano espacial, la investigación se circunscribe a los límites municipales que conforman ambas regiones.

El Valle de Aburrá comprende los municipios de Caldas, La Estrella, Sabaneta, Envigado, Itagüí, Medellín, Bello, Copacabana, Girardota y Barbosa, mientras que el Altiplano del Oriente incluye principalmente a Rionegro, La Ceja, Marinilla, El Carmen de Viboral, Guarne, El Retiro, San Vicente Ferrer y La Unión.

Esta delimitación permite comparar un sistema metropolitano consolidado con otro en fase de expansión acelerada, evidenciando sus diferencias morfológicas, ecológicas y funcionales.

En el plano temporal, el estudio abarca un periodo de cuatro décadas (1984–2025), seleccionado por corresponder a la disponibilidad continua de imágenes satelitales Landsat y a las etapas más representativas del proceso de urbanización contemporánea. Este rango permite observar la evolución territorial en intervalos multianuales y establecer tendencias que reflejen los cambios en la ocupación del suelo, la densificación y la configuración de núcleos urbanos.

El alcance metodológico incluye el análisis multitemporal de coberturas urbanas, la identificación de patrones espaciales y la estimación de tendencias de expansión mediante herramientas de

ANÁLISIS MULTITEMPORAL COMPARATIVO DE LA EXPANSIÓN URBANA (1984-2025) EN EL VALLE DE ABURRÁ Y EL ALTIPLANO DEL ORIENTE ANTIOQUEÑO

teledetección y análisis geográfico. Así mismo, incorpora una fase de validación y comparación entre ambas regiones, lo que amplía la aplicabilidad del enfoque a otros contextos metropolitanos del país. En términos generales, la delimitación propuesta garantiza la coherencia entre los objetivos, la escala de análisis y los resultados esperados, permitiendo construir una visión integral de la transformación urbana en Antioquia.

2. Marco conceptual y referencial

2.1. Urbanización y expansión urbana: enfoques teóricos y empíricos

La urbanización es uno de los procesos más determinantes en la transformación actual del territorio. Desde mediados del siglo XX, la humanidad ha experimentado una transición acelerada de lo rural a lo urbano, modificando de manera profunda la estructura espacial, los patrones de consumo y las dinámicas socioeconómicas globales (ONU-Hábitat, 2020). Según proyecciones internacionales, para 2050 cerca del 70 % de la población mundial residirá en ciudades, lo que incrementará la demanda de suelo, infraestructura y recursos naturales en proporciones sin precedentes (Banco Mundial, 2021).

Este proceso, inicialmente asociado al desarrollo económico y a la modernización industrial, ha dado lugar a una reconfiguración funcional del espacio, en la que las ciudades se convierten en nodos de articulación económica, tecnológica y cultural, pero también en focos de desequilibrio ambiental y social. Autores como Lefebvre (1970) y Harvey (1996) conciben la urbanización como una forma de producción del espacio donde confluyen intereses económicos, tecnológicos y políticos que transforman el territorio más allá de sus límites físicos, extendiendo la influencia urbana hacia zonas rurales y naturales (Lefebvre, 1970) (Harvey, 1996).

En las últimas décadas, el fenómeno ha adoptado una dimensión metropolitana y policéntrica, caracterizada por la continuidad funcional entre municipios y la expansión de las periferias (Soja, 2010). Este patrón de crecimiento se traduce en la consolidación de corredores urbanos y en la aparición de regiones intermedias donde la urbanización se mezcla con usos agrícolas y

ANÁLISIS MULTITEMPORAL COMPARATIVO DE LA EXPANSIÓN URBANA (1984-2025) EN EL VALLE DE ABURRÁ Y EL ALTIPLANO DEL ORIENTE ANTIOQUEÑO

ecológicos. Tales transiciones territoriales, conocidas como “urbanización difusa” o “expansión urbana extendida”, plantean nuevos retos para la planificación y la sostenibilidad del territorio (Brenner, 2013).

En América Latina, la urbanización ha seguido un curso particularmente rápido y desigual. La región pasó de ser mayoritariamente rural a estar compuesta en más de un 80 % por población urbana en apenas medio siglo (CEPAL, 2019). Este proceso, aunque generó avances en conectividad e infraestructura, también trajo consigo procesos de ocupación desordenada, desigualdad espacial y presión sobre los ecosistemas periurbanos. Investigaciones de Borsdorf y Hidalgo (2010) y Dávila (2015) destacan que la expansión urbana latinoamericana tiende a combinar áreas de densificación interna con un crecimiento periférico de baja densidad, en muchos casos carente de planificación y con un fuerte impacto ambiental.

En el contexto colombiano, la urbanización ha estado estrechamente ligada a los procesos de industrialización, migración interna y concentración de servicios en las capitales departamentales (Departamento Nacional de Planeación, 2022). Las principales áreas metropolitanas, como Bogotá, Cali, Barranquilla y Medellín, concentran gran parte de la población y del producto interno bruto nacional, generando desequilibrios territoriales frente a las zonas rurales y de menor densidad. Este modelo de concentración urbana ha propiciado la aparición de regiones metropolitanas extendidas, donde los límites político-administrativos resultan insuficientes para describir la realidad territorial.

En el caso antioqueño, el proceso urbano refleja las tendencias globales y nacionales, pero con características propias derivadas de su topografía, su estructura económica y su conectividad regional. La expansión metropolitana del Valle de Aburrá ha dado lugar a un sistema urbano de alta densidad, conectado funcionalmente con el Altiplano del Oriente Antioqueño, que actúa como zona de expansión, residencia y producción complementaria. Este vínculo metropolitano, basado en flujos laborales, residenciales y de servicios, configura una unidad espacial interdependiente donde la urbanización continúa extendiéndose más allá de los límites formales del área metropolitana (Echeverri, 2019). Desde una perspectiva empírica, los estudios recientes en Antioquia confirman un crecimiento urbano acelerado y espacialmente heterogéneo, en el que la

ANÁLISIS MULTITEMPORAL COMPARATIVO DE LA EXPANSIÓN URBANA (1984-2025) EN EL VALLE DE ABURRÁ Y EL ALTIPLANO DEL ORIENTE ANTIOQUEÑO

presión inmobiliaria, la infraestructura vial y la localización estratégica de equipamientos han impulsado la conversión del suelo rural en urbano. Esta transformación, aunque favorece la integración regional, implica también la fragmentación de ecosistemas, la pérdida de servicios ambientales y la reducción progresiva de suelos productivos (CORNARE, 2022; Gobernación de Antioquia, 2021).

En síntesis, la urbanización y la expansión urbana constituyen fenómenos complejos y multidimensionales que deben entenderse como procesos espaciales, temporales y funcionales, cuyas manifestaciones locales como en el Valle de Aburrá y el Altiplano del Oriente Antioqueño son parte de una tendencia global de reconfiguración territorial. Su análisis requiere integrar la observación multitemporal, la interpretación espacial y la comprensión de los factores que impulsan el cambio, con el fin de reconocer no solo la magnitud del crecimiento, sino también sus implicaciones sobre la sostenibilidad y la estructura ecológica regional.

2.2. Dinámica territorial del Valle de Aburrá y del Altiplano del Oriente Antioqueño

El territorio antioqueño (Imagen 1.b) ha experimentado una transformación espacial profunda derivada de la expansión urbana continua de sus principales centros poblados. Entre ellos, el Área Metropolitana del Valle de Aburrá (AMVA) y el Altiplano del Oriente Antioqueño (AOA) conforman el eje más dinámico y funcional del departamento, donde se concentran los mayores procesos de crecimiento, conurbación y presión sobre los recursos naturales (Gobernación de Antioquia, 2021). Aunque ambos territorios presentan trayectorias urbanas distintas, su relación ha evolucionado hacia una integración metropolitana extendida que trasciende los límites administrativos y genera una nueva configuración territorial regional (Echeverri, 2019).

ANÁLISIS MULTITEMPORAL COMPARATIVO DE LA EXPANSIÓN URBANA (1984-2025) EN EL VALLE DE ABURRÁ Y EL ALTIPLANO DEL ORIENTE ANTIOQUEÑO

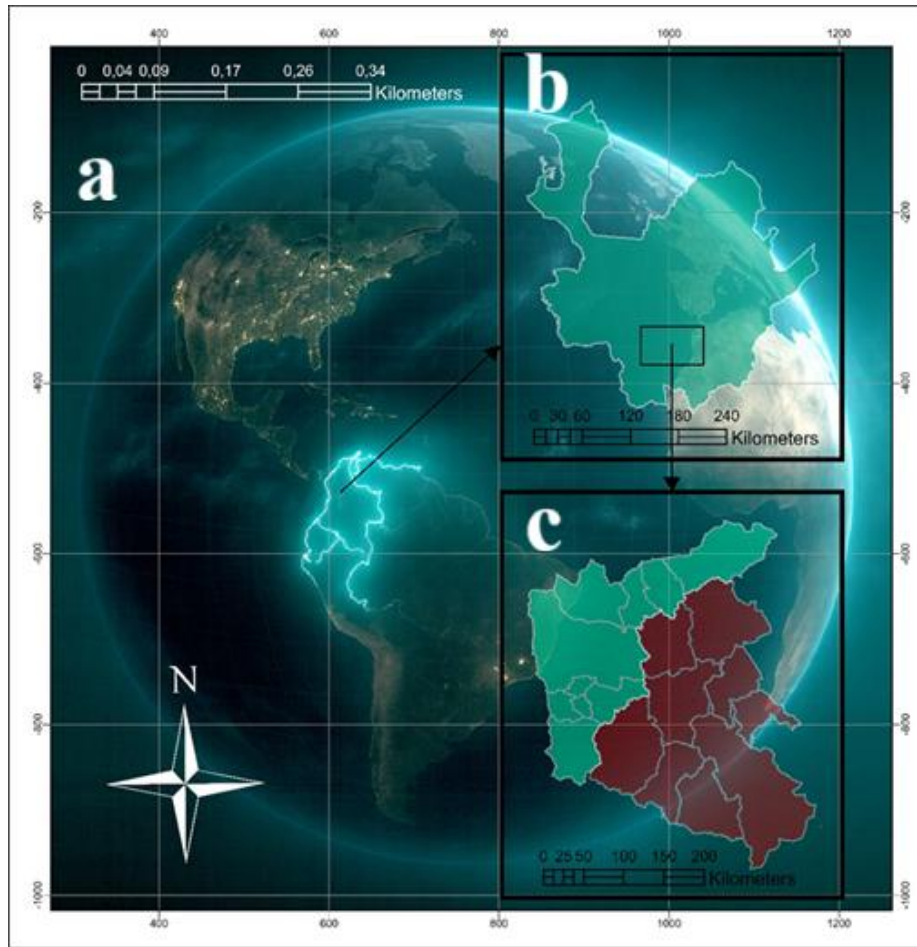


Imagen 1. Ubicación del área de estudio_ Elaboración propia ArcGISPro.

El Valle de Aburrá (c_Verde), con Medellín como núcleo principal, constituye una cuenca alargada y estrecha encajada entre las montañas de la cordillera Central. Su topografía condiciona una estructura urbana lineal en sentido norte-sur, donde la expansión se ha dado por densificación interna y crecimiento hacia las laderas (AMVA, 2021). Este patrón ha propiciado un alto grado de continuidad urbana entre municipios contiguos, configurando un sistema metropolitano consolidado con fuerte dependencia de la infraestructura de transporte y con limitaciones para la expansión horizontal. A lo largo de las últimas décadas, la saturación del suelo disponible y la concentración demográfica han derivado en un proceso de verticalización y en la presión creciente sobre los ecosistemas de borde, las cuencas abastecedoras y las zonas de riesgo geotécnico (Restrepo & Pineda, 2020).

ANÁLISIS MULTITEMPORAL COMPARATIVO DE LA EXPANSIÓN URBANA (1984-2025) EN EL VALLE DE ABURRÁ Y EL ALTIPLANO DEL ORIENTE ANTIOQUEÑO

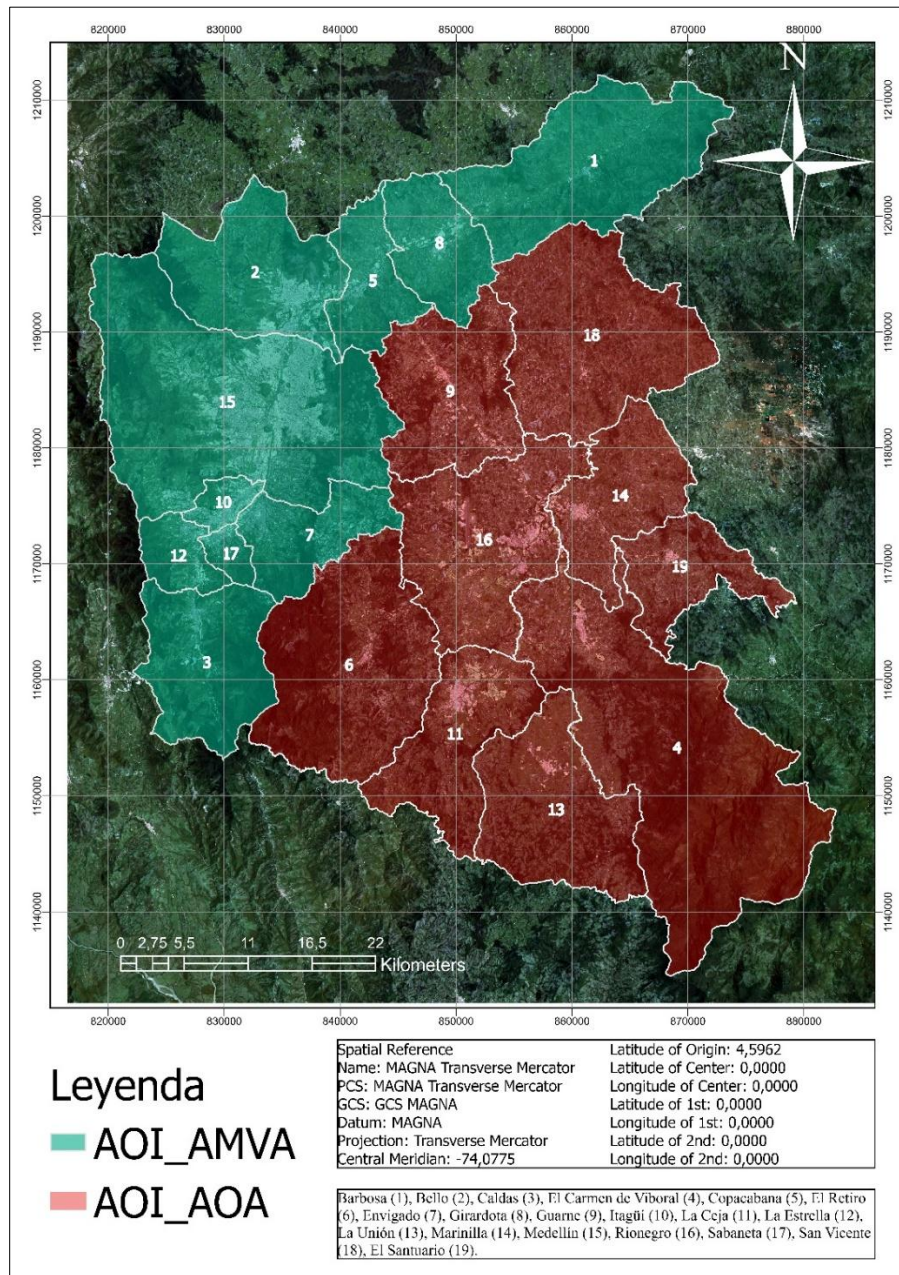


Imagen 2. Localización del área de estudio. Elaboración propia ArcGISPro.

Por su parte, el Altiplano del Oriente Antioqueño (AOA) (c_Rojo) ha pasado de ser una subregión de base agrícola y forestal a constituirse en un espacio receptor del crecimiento metropolitano. Su localización estratégica, la presencia del aeropuerto José María Córdova y la conectividad vial con Medellín han convertido al altiplano en un territorio de expansión residencial, industrial y turística (CORNARE, 2022). Municipios como Rionegro, La Ceja, Marinilla, El Carmen de Viboral,

**ANÁLISIS MULTITEMPORAL COMPARATIVO DE LA EXPANSIÓN URBANA (1984-2025)
EN EL VALLE DE ABURRÁ Y EL ALTIPLANO DEL ORIENTE ANTIOQUEÑO**

Guarne y El Retiro concentran los mayores índices de transformación urbana reciente, configurando un mosaico territorial donde se superponen usos urbanos, rurales y ambientales.

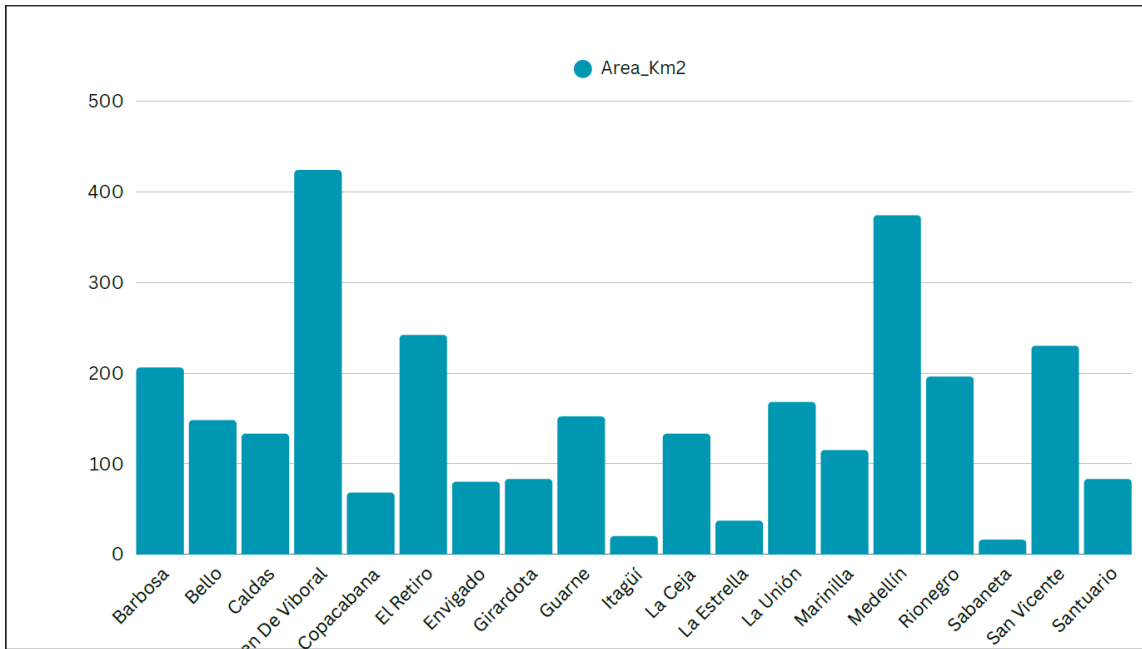
A nivel morfológico, el patrón territorial conjunto puede interpretarse como un sistema urbano binuclear, en el que un núcleo metropolitano consolidado (AMVA) se articula con un territorio en fase de expansión acelerada (AOA). Esta configuración, observable en otros contextos metropolitanos latinoamericanos, evidencia la tendencia hacia la policentralidad y la integración de áreas funcionales urbanas más amplias (Brenner, 2013).

En síntesis, la dinámica territorial del Valle de Aburrá y del Altiplano del Oriente Antioqueño expresa dos complementos de un mismo proceso urbano: la densificación y consolidación interna de una metrópoli saturada y la expansión horizontal acelerada de su periferia. Analizar ambas regiones de manera integrada permite comprender la magnitud del fenómeno de urbanización extendida en Antioquia, sus implicaciones ambientales y su relevancia para los procesos de ordenamiento territorial y planificación regional.

Tabla 1. Distribución de áreas por AOI_ Elaboración propia ArcGISPro; Excel; Entornos Python.

NumberID	AOI	MpNombre	Area_Km2	Area_Ha
1	AMVA	Barbosa	206	20569
2	AMVA	Bello	148	14790
3	AMVA	Caldas	133	13280
5	AMVA	Copacabana	68	6795
7	AMVA	Envigado	80	8003
8	AMVA	Girardota	83	8283
10	AMVA	Itagüí	20	1951
12	AMVA	La Estrella	37	3685
15	AMVA	Medellín	374	37353
17	AMVA	Sabaneta	16	1574
4	AOA	Carmen De Viboral	424	42365
6	AOA	El Retiro	242	24199
9	AOA	Guarne	152	15221
11	AOA	La Ceja	133	13271
13	AOA	La Unión	168	16774
14	AOA	Marinilla	115	11487
16	AOA	Rionegro	196	19595
18	AOA	San Vicente	230	23049
19	AOA	Santuario	83	8345

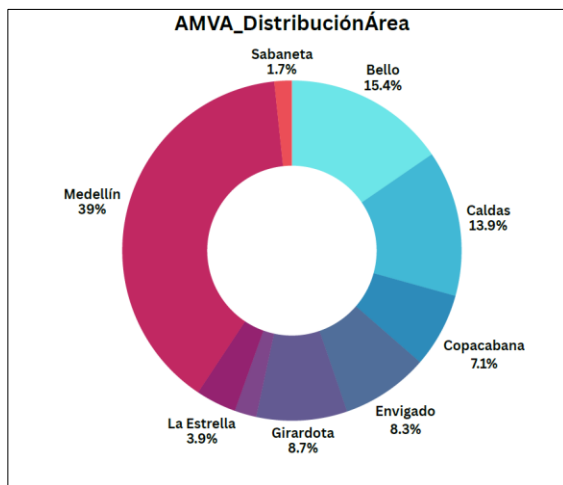
**ANÁLISIS MULTITEMPORAL COMPARATIVO DE LA EXPANSIÓN URBANA (1984-2025)
EN EL VALLE DE ABURRÁ Y EL ALTIPLANO DEL ORIENTE ANTIOQUEÑO**



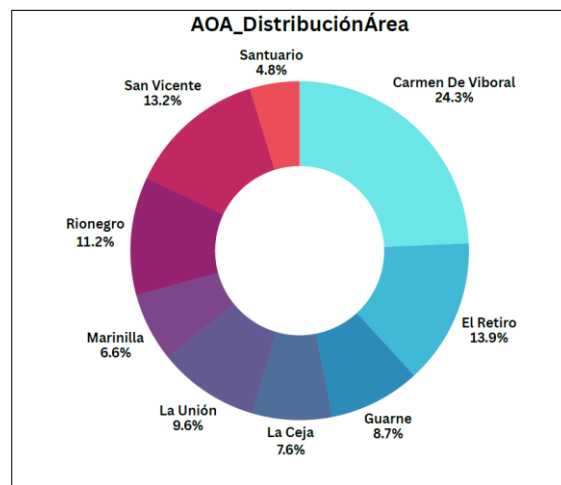
Gráfica 1. Áreas por municipio AOI_Total_ Elaboración propia ArcGISPro; Excel; Entornos Python.

Tabla 2. Áreas totales por AOI_ Elaboración propia ArcGISPro; Excel; Entornos Python.

AOI	Area_Total_Ha	Area_Total_km2
AMVA	1165	116283
AOA	1743	174306



Gráfica 3. Distribución de áreas por municipio AMVA_ Elaboración propia ArcGISPro; Excel; Entornos Python.



Gráfica 2. Distribución de áreas por municipio AOA_ Elaboración propia ArcGISPro; Excel; Entornos Python.

El conjunto de visualizaciones resume la superficie total municipal dentro del AOI completo (AMVA + AOA). El gráfico de barras compara el área administrativa (km²) de cada municipio y

ANÁLISIS MULTITEMPORAL COMPARATIVO DE LA EXPANSIÓN URBANA (1984-2025) EN EL VALLE DE ABURRÁ Y EL ALTIPLANO DEL ORIENTE ANTIOQUEÑO

muestra una distribución heterogénea con pocos municipios de gran extensión y un bloque mayoritario de áreas medias–bajas. La tabla de totales cuantifica la magnitud del AOI y sirve de base para normalizar indicadores posteriores (por ejemplo, porcentaje urbano respecto al área municipal). Los diagramas circulares desagregan la participación de cada municipio en la superficie total de sus respectivas subregiones (AMVA y AOA), evidenciando qué tan concentrado o disperso está el territorio disponible dentro de cada ámbito. En conjunto, estas piezas establecen la línea base territorial sobre la cual se interpretan, más adelante, los patrones de urbanización y las métricas de cambio.

2.3. Teledetección y análisis multitemporal en estudios urbanos

La teledetección proporciona un registro sistemático y comparable del territorio que permite observar la evolución de las coberturas a lo largo del tiempo, a partir de mediciones espectrales realizadas por sensores satelitales (Jensen, 2015). En el ámbito urbano, su principal valor radica en la posibilidad de monitorizar cambios de forma consistente, integrando grandes extensiones espaciales con series temporales extensas, algo difícil de lograr con técnicas exclusivamente *in situ* (Campbell & Wynne, 2011).

Desde la década de 1980, los programas satelitales de Landsat han garantizado una continuidad histórica con resolución de 30 metros y repetitividad adecuada para análisis multitemporales de expansión urbana, gracias a la compatibilidad entre misiones sucesivas y a productos de reflectancia de superficie estandarizados (Roy et al., 2014; Wulder et al., 2019). Este acervo permite construir series temporales y composiciones estacionales que reducen la interferencia de nubes y variaciones atmosféricas, y comparan periodos homogéneos entre años (Zhu & Woodcock, 2014).

En términos operativos, el análisis urbano multitemporal combina tres pilares:

- a. Preprocesamiento y armonización (corrección atmosférica, enmascaramiento de nubes/sombras y estandarización radiométrica) para asegurar comparabilidad entre fechas y sensores (Roy et al., 2014; Zhu & Woodcock, 2014).
- b. Derivación de variables espectrales sensibles a vegetación, agua y superficie construida, como NDVI, MNDWI y NDBI, así como combinaciones de bandas en el visible, infrarrojo cercano y de onda corta que capturan diferencias de textura y albedo urbano (Zha, Gao & Ni, 2003; Lu et al., 2004).

ANÁLISIS MULTITEMPORAL COMPARATIVO DE LA EXPANSIÓN URBANA (1984-2025) EN EL VALLE DE ABURRÁ Y EL ALTIPLANO DEL ORIENTE ANTIOQUEÑO

- c. Estrategias de detección de cambio, que van desde métodos de comparación post-clasificación y diferenciación de imágenes, hasta enfoques de trayectorias temporales que modelan la evolución de píxeles o segmentos a través del tiempo (Singh, 1989; Coppin et al., 2004).

La literatura urbana ha mostrado consistentemente que la superficie construida presenta firmas espectrales y texturales distintas a la vegetación y al suelo desnudo, permitiendo su identificación en mosaicos multibanda e índices compuestos, especialmente cuando se controlan condiciones fenológicas y estacionales (Herold, Roberts & Clarke, 2003; Lu et al., 2004). En contextos metropolitanos andinos, donde coexisten densificación en valles estrechos y expansión horizontal en mesetas adyacentes, el análisis multitemporal facilita distinguir entre crecimiento interno de la huella urbana, ocupación de bordes y consolidación de corredores (Borsdorf & Hidalgo, 2010).

Para fines comparativos entre unidades territoriales, la consistencia metodológica requiere:

- Ventanas temporales equivalentes y composiciones estacionales comparables para minimizar sesgos fenológicos (Coppin et al., 2004).
- Umbrales y reglas reproducibles para la binarización urbano/no urbano, apoyadas en métricas de desempeño (precisión global, F1, IoU) sobre matrices de confusión (Jensen, 2015).
- Documentación de parámetros y metadatos que permitan replicar el flujo en diferentes áreas metropolitanas (Wulder et al., 2019).

Aplicado a regiones como el Valle de Aburrá y el Altiplano del Oriente Antioqueño, el enfoque multitemporal permite:

- a. reconstruir la trayectoria histórica del crecimiento urbano.
- b. comparar patrones de densificación y expansión entre un valle metropolitano consolidado y un altiplano en rápida transformación, y derivar tendencias que orienten escenarios de continuidad del cambio.
- c. En conjunto, la teledetección multitemporal ofrece una base empírica robusta para caracterizar la dinámica urbana y evaluar sus implicaciones territoriales y ambientales en sistemas metropolitanos interconectados (Lu et al., 2004; Wulder et al., 2019).

ANÁLISIS MULTITEMPORAL COMPARATIVO DE LA EXPANSIÓN URBANA (1984-2025) EN EL VALLE DE ABURRÁ Y EL ALTIPLANO DEL ORIENTE ANTIOQUEÑO

2.4. Modelos y metodologías para detección de cambios y predicción espacial

El análisis de la expansión urbana integra dos frentes complementarios: detectar dónde y cómo cambió el territorio, y predecir hacia dónde tiende a cambiar. A continuación, se sintetizan los enfoques más usados y su pertinencia para contextos como el Valle de Aburrá (densificación en valle estrecho) y el Altiplano del Oriente Antioqueño (expansión horizontal y policéntrica).

2.4.1 Detección de cambios (retrospectiva)

a) Métodos basados en píxel e índices

- Diferencias y razones de bandas/índices: restas entre fechas de NDVI, NDBI, MNDWI u otros compuestos para resaltar ganancia/pérdida de coberturas (Singh, 1989).
- Análisis de vector de cambio (CVA): evalúa magnitud y dirección del cambio en el espacio espectral multibanda, útil para distinguir transiciones suelo–urbano vs. vegetación–urbano (Coppin et al., 2004).
- Transformaciones espectrales: Tasseled Cap, PCA o componentes independientes para separar “brillo” (urbano) de “verdor” y “humedad” (Coppin et al., 2004).

b) Comparación post–clasificación

Clasificar cada fecha y luego cruzar mapas para obtener matrices de transición; es robusto frente a variaciones radiométricas y facilita estadísticas de cambio por clase (Lu, Mausel, Brondízio & Moran, 2004).

c) Series temporales y trayectorias

- Modelos de trayectoria de píxeles: detectan rupturas o tendencias persistentes (p. ej., “no urbano → urbano”) y reducen falsos positivos estacionales (Coppin et al., 2004).
- Ajustes segmentados y detección de rupturas: técnicas de descomposición temporal que identifican años de cambio sostenido en secuencias anuales (Zhu & Woodcock, 2014).

d) Unidades de objeto (OBIA)

ANÁLISIS MULTITEMPORAL COMPARATIVO DE LA EXPANSIÓN URBANA (1984-2025) EN EL VALLE DE ABURRÁ Y EL ALTIPLANO DEL ORIENTE ANTIOQUEÑO

Segmentación en objetos y clasificación por forma, textura y contexto para reducir ruido en zonas densas; útil en tejidos urbanos heterogéneos (Herold, Roberts & Clarke, 2003).

e) Aprendizaje automático

Clasificadores como Random Forest, SVM o Gradient Boosting integran bandas, índices y variables auxiliares (pendiente, accesibilidad) para mapear urbano/no urbano y luego derivar el cambio por cruce temporal (Jensen, 2015).

f) Validación Precisión global, F1 e IoU por clase; matrices de confusión y muestreo estratificado; reporte de incertidumbre y sensibilidad a umbrales (Pontius & Millones, 2011).

2.4.2 Pertinencia para AMVA y AOA

- En AMVA, la topografía y el tejido consolidado favorecen enfoques de densificación y relleno: trayectorias temporales y modelos con fuertes condicionantes de pendiente y accesibilidad.
- En el AOA, la expansión horizontal policéntrica se capta bien con CA–Markov o MCE alimentados por accesibilidad a corredores, cercanía a subcentros y restricciones agroambientales.
- En ambos casos, la combinación “detección robusta del pasado + pronóstico con variables físicas y funcionales” ofrece una ruta consistente para estimar direcciones y magnitudes probables de crecimiento.

2.5 Revisión de estudios comparativos (Global, Latinoamérica y Colombia)

2.5.1 Estudios globales

En el ámbito internacional, la aplicación de técnicas de teledetección y modelación espacial ha permitido caracterizar las tendencias globales de expansión urbana y sus impactos ambientales.

- a) El proyecto Global Human Settlement Layer (GHSL) de la Comisión Europea y los análisis del programa NASA Land Cover and Land Use Change (LCLUC) constituyen los referentes más amplios en monitoreo multitemporal, integrando series Landsat, Sentinel y MODIS para evaluar la huella urbana global desde 1975 (Pesaresi et al., 2016).
- b) Estudios recientes han empleado algoritmos de aprendizaje automático y fusión de datos ópticos y radar para estimar la expansión metropolitana global y su relación con la densidad poblacional,

ANÁLISIS MULTITEMPORAL COMPARATIVO DE LA EXPANSIÓN URBANA (1984-2025) EN EL VALLE DE ABURRÁ Y EL ALTIPLANO DEL ORIENTE ANTIOQUEÑO

cobertura vegetal y emisiones de carbono (Liu et al., 2022). Otros trabajos, como los de Zhou et al. (2021) y Gao et al. (2023), han demostrado que la integración de sensores ópticos con modelos de autómatas celulares permite identificar patrones de crecimiento urbano a escala planetaria y regional, con alta capacidad de replicabilidad metodológica.

Estos avances evidencian una tendencia hacia la modelación semi-automatizada, basada en flujos reproducibles y datos abiertos, que facilitan la comparación de procesos urbanos en diferentes contextos geográficos. Su relevancia para estudios regionales como el AMVA y el AOA radica en la posibilidad de adaptar estas metodologías globales a escalas locales, manteniendo la consistencia espacial y temporal del análisis.

2.5.2 Estudios en Latinoamérica

En América Latina, la urbanización acelerada ha sido ampliamente documentada mediante técnicas de detección de cambio y modelación predictiva.

- a) En México, Contreras et al. (2022) aplicaron el modelo Geomod para mapear la expansión periurbana en la zona metropolitana de Toluca y proyectar escenarios al año 2024, integrando variables de accesibilidad, topografía y uso del suelo.
- b) En Chile, Martínez y Pérez (2024) utilizaron series Landsat y Sentinel-2 para analizar la expansión de áreas construidas entre 2000 y 2022 a nivel nacional, con resultados que muestran una tendencia a la urbanización concentrada en los valles interandinos.
- c) Por su parte, Morales et al. (2023) demostraron, en la región de Cancún, la relación entre crecimiento urbano y islas de calor mediante índices térmicos derivados de teledetección, lo que evidencia impactos ambientales asociados al proceso de expansión.

En conjunto, estos trabajos coinciden en que la urbanización latinoamericana combina procesos de densificación interna con expansión horizontal difusa, y que los métodos semi-automatizados basados en series satelitales son idóneos para capturar dichas dinámicas en escenarios de rápida transformación.

2.5.3 Estudios en Colombia

**ANÁLISIS MULTITEMPORAL COMPARATIVO DE LA EXPANSIÓN URBANA (1984-2025)
EN EL VALLE DE ABURRÁ Y EL ALTIPLANO DEL ORIENTE ANTIOQUEÑO**

En el contexto colombiano, la aplicación de herramientas geoespaciales para analizar la expansión urbana ha crecido significativamente en la última década.

- a) En Bogotá, Ramírez et al. (2023) desarrollaron un modelo de autómatas celulares FLUS para simular el cambio de coberturas urbanas y anticipar escenarios a 20 años, integrando variables de pendiente, red vial y proximidad a centros urbanos.
- b) En Medellín, Kühnl et al. (2021) aplicaron técnicas de clasificación orientada a objetos (OBIA) y aprendizaje automático para identificar zonas climáticas locales (LCZ), diferenciando morfologías urbanas asociadas a procesos de densificación.
- c) En el Valle de Aburrá, Gómez et al. (2024) combinaron imágenes SAR y ópticas para caracterizar el crecimiento urbano multitemporal bajo condiciones de nubosidad alta, mostrando el potencial de sensores complementarios para monitorear regiones tropicales.
- d) Finalmente, el estudio comparativo de Rodríguez y Castaño (2023) sobre grandes áreas metropolitanas del país evidenció discrepancias entre la expansión observada y la planeada en los POT, subrayando la necesidad de incorporar análisis espaciales continuos en la gestión urbana.

Estos trabajos nacionales demuestran la viabilidad y pertinencia de los métodos semi-automatizados para monitorear la dinámica urbana en distintas escalas, y constituyen antecedentes directos que sustentan la aplicación de análisis multitemporal comparativo entre el AMVA y el AOA.

Tabla 3. Resumen de estudios comparativos_ Elaboración propia Excel; Entornos Python.

Región / Caso de estudio	Autores y año	Método principal	Enfoque o resultado clave	Fuente / Revista
Global (1975–2020)	Pesaresi et al. (2016)	GHSL – Landsat multitemporal	Evaluación global de huella urbana y densidad poblacional	<i>Remote Sensing of Environment</i>
Global (2000–2020)	Liu et al. (2022)	ML + fusión óptica– radar	Predicción global de expansión urbana y emisiones	<i>Nature Communications</i>
Global (2010–2022)	Zhou et al. (2021); Gao et al. (2023)	CA–Markov + aprendizaje automático	Modelación planetaria de crecimiento urbano	<i>ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing</i>

**ANÁLISIS MULTITEMPORAL COMPARATIVO DE LA EXPANSIÓN URBANA (1984-2025)
EN EL VALLE DE ABURRÁ Y EL ALTIPLANO DEL ORIENTE ANTIOQUEÑO**

México (Toluca)	Contreras et al. (2022)	Geomod + Landsat	Escenarios de expansión periurbana 2014–2024	<i>Buildings & Cities</i>
Chile (nacional)	Martínez & Pérez (2024)	Serie Landsat–Sentinel	Mapeo nacional de expansión urbana 2000–2022	<i>ISPRS Archives</i>
México (Cancún)	Morales et al. (2023)	Índices térmicos + Landsat 8	Relación urbanización–temperatura superficial	<i>Science of the Total Environment</i>
Bogotá (humedales metropolitanos)	Ramírez et al. (2023)	CA–FLUS + datos espaciales	Escenarios de crecimiento urbano a 20 años	<i>Scientific Reports</i>
Medellín (LCZ)	Kühnl et al. (2021)	OBIA + ML	Clasificación morfológica urbana con imágenes Sentinel	<i>REAL CORP Proceedings</i>
Valle de Aburrá	Gómez et al. (2024)	SAR + óptico	Detección multitemporal bajo nubosidad	<i>Remote Sensing</i>
Áreas metropolitanas colombianas	Rodríguez & Castaño (2023)	Comparativo observada vs. planeada	Evaluación de expansión real frente a POT	<i>Buildings & Cities</i>

2.5.4 Síntesis aplicable a AMVA–AOA

Los estudios revisados confirman que las metodologías basadas en teledetección multitemporal y modelación semi-automatizada particularmente las que combinan aprendizaje automático, OBIA y modelos CA–Markov o FLUS, permiten describir, comparar y proyectar patrones de crecimiento urbano con alta precisión espacial. En el contexto del Valle de Aburrá y el Altiplano del Oriente Antioqueño, su aplicación posibilita:

- a) reconstruir la evolución territorial de las últimas cuatro décadas.
- b) analizar la relación entre densificación y expansión dispersa.

2.6. Marco normativo y de ordenamiento territorial

El ordenamiento del territorio colombiano se fundamenta en un marco normativo que busca articular el desarrollo urbano con la sostenibilidad ambiental y la gestión integral del riesgo. Las normas vigentes establecen los instrumentos técnicos, jurídicos e institucionales que orientan la ocupación del suelo y la conservación de los ecosistemas, funciones que cobran especial relevancia

ANÁLISIS MULTITEMPORAL COMPARATIVO DE LA EXPANSIÓN URBANA (1984-2025) EN EL VALLE DE ABURRÁ Y EL ALTIPLANO DEL ORIENTE ANTIOQUEÑO

en regiones donde la expansión urbana avanza sobre áreas ambientalmente sensibles, como ocurre en el Valle de Aburrá y el Altiplano del Oriente Antioqueño.

En el nivel nacional, la Ley 99 de 1993 sentó las bases del Sistema Nacional Ambiental (SINA) y asignó competencias a las Corporaciones Autónomas Regionales (CAR) y a las autoridades ambientales urbanas, promoviendo la integración entre ordenamiento territorial y protección de los recursos naturales. La Ley 388 de 1997 complementó este marco al establecer que el ordenamiento territorial es una función pública orientada a racionalizar el uso del suelo, equilibrar el desarrollo urbano y rural, y garantizar la sostenibilidad del ambiente. Estas disposiciones obligan a los municipios a formular Planes de Ordenamiento Territorial (POT), Planes Básicos de Ordenamiento Territorial (PBOT) o Esquemas de Ordenamiento Territorial (EOT), según su tamaño y jerarquía administrativa (Ley 388, 1997).

El marco se amplía con la Ley 1523 de 2012, que incorpora la gestión del riesgo de desastres como eje transversal de la planificación, y con la Ley 1931 de 2018, que obliga a integrar medidas de adaptación al cambio climático en los instrumentos de ordenamiento. Por su parte, el Decreto 1640 de 2012 reglamenta la formulación de los Planes de Ordenación y Manejo de Cuencas Hidrográficas (POMCA), los cuales son vinculantes para los POT y PBOT y establecen las determinantes ambientales del territorio. En el caso del Oriente Antioqueño, el POMCA del río Negro–Nare (CORNARE, 2021) define las zonas de recarga hídrica, rondas de protección y áreas de conservación que deben mantenerse fuera del proceso de expansión urbana.

En el nivel regional, dos entidades desempeñan un papel determinante: el Área Metropolitana del Valle de Aburrá (AMVA) y la Corporación Autónoma Regional de las Cuencas de los Ríos Negro y Nare (CORNARE). El AMVA, como autoridad ambiental urbana, ejerce competencias sobre los diez municipios metropolitanos —Medellín, Bello, Itagüí, Envigado, Sabaneta, La Estrella, Caldas, Copacabana, Girardota y Barbosa—, definiendo políticas conjuntas de movilidad, espacio público, densificación y gestión ambiental (AMVA, 2020). Por su parte, CORNARE actúa como autoridad ambiental regional en los municipios del Altiplano del Oriente Antioqueño, estableciendo los lineamientos de sostenibilidad y uso racional del suelo rural y urbano (CORNARE, 2022).

ANÁLISIS MULTITEMPORAL COMPARATIVO DE LA EXPANSIÓN URBANA (1984-2025) EN EL VALLE DE ABURRÁ Y EL ALTIPLANO DEL ORIENTE ANTIOQUEÑO

Entre los instrumentos específicos destacan el Plan Director de Ordenamiento Metropolitano (PDOM) del Valle de Aburrá, orientado a consolidar una estructura urbana densa y conectada, y el conjunto de POT y PBOT municipales del Altiplano, que buscan equilibrar el crecimiento urbano con la protección de suelos agrícolas y ecosistemas de montaña. CORNARE, mediante el Acuerdo 265 de 2019, definió los criterios técnicos para las determinantes ambientales, las cuales incluyen la delimitación de rondas hídricas, zonas de amenaza y corredores ecológicos, que deben ser incorporadas obligatoriamente en los instrumentos de ordenamiento local.

Si bien la información geoespacial del AMVA se encuentra actualmente limitada por la inoperatividad de su geoportal, el acceso a la cartografía ambiental oficial de CORNARE y del IDEAM (2022) permite avanzar en el análisis comparativo de las áreas protegidas, zonas de recarga hídrica y suelos de conservación. Esta información será de utilidad para la elaboración de mapas temáticos que contrasten la expansión urbana con las restricciones ambientales y las áreas de importancia ecológica, tanto en el sistema metropolitano del Aburrá como en el Altiplano.

En síntesis, el marco normativo vigente reconoce la necesidad de armonizar el desarrollo urbano con la conservación ambiental y la gestión del riesgo. Sin embargo, la expansión acelerada observada en ambas regiones ha superado en muchos casos los límites y determinantes establecidos, generando conflictos entre la vocación del suelo y su uso actual. Por tanto, el análisis espacial comparativo de la expansión urbana en el Valle de Aburrá y el Altiplano del Oriente Antioqueño se inscribe dentro de este marco legal, buscando evidenciar la correspondencia o la falta de ella, entre la planificación normativa y la dinámica real del territorio.

3. Marco metodológico

3.1 Enfoque de investigación y tipo de estudio (aplicado, descriptivo, espacial)

La investigación se enmarca dentro de un enfoque aplicado, descriptivo y espacial, sustentado en métodos cuantitativos y geoespaciales. Es aplicado porque emplea técnicas de análisis satelital y modelación territorial con el propósito de obtener resultados útiles para la comprensión de la

ANÁLISIS MULTITEMPORAL COMPARATIVO DE LA EXPANSIÓN URBANA (1984-2025) EN EL VALLE DE ABURRÁ Y EL ALTIPLANO DEL ORIENTE ANTIOQUEÑO

expansión urbana y su potencial proyección futura. Es descriptivo al centrarse en identificar y caracterizar los patrones de cambio espacial ocurridos en las últimas cuatro décadas, sin intervenir directamente sobre el fenómeno. Finalmente, es espacial por cuanto utiliza herramientas de Sistemas de Información Geográfica (SIG) y teledetección para representar y analizar las transformaciones territoriales a través de la dimensión geográfica y temporal.

El diseño metodológico se estructura bajo un modelo de análisis multitemporal comparativo, que integra distintas fuentes de información satelital, cartográfica y estadística. Dicho enfoque permite cuantificar la magnitud del crecimiento urbano, distinguir entre procesos de densificación y expansión, y establecer comparaciones entre dos unidades territoriales de características contrastantes: el Área Metropolitana del Valle de Aburrá (AMVA) y el Altiplano del Oriente Antioqueño (AOA).

La aplicación de métodos reproducibles y plataformas de procesamiento en la nube como Google Earth Engine y Google Colab garantiza la replicabilidad y trazabilidad de los resultados, principios fundamentales de los estudios geoinformáticos contemporáneos (Jensen, 2015; Roy et al., 2014). En este sentido, el presente trabajo combina componentes de análisis espacial, modelación temporal y validación cartográfica dentro de un esquema integrado que facilita la interpretación de los procesos urbanos desde una perspectiva sistémica.

3.2 Área de estudio (Valle de Aburrá y Altiplano del Oriente Antioqueño): ubicación, extensión y características físicas

El estudio abarca dos unidades territoriales localizadas en el centro y oriente del departamento de Antioquia, caracterizadas por su fuerte interdependencia funcional y contrastes morfológicos y ambientales.

El Área Metropolitana del Valle de Aburrá (AMVA) comprende diez municipios: Caldas, La Estrella, Sabaneta, Envigado, Itagüí, Medellín, Bello, Copacabana, Girardota y Barbosa. Su extensión aproximada es de 1.152 km², con altitudes que oscilan entre 1.250 y 1.800 m s. n. m. La morfología alargada del valle, encajada entre las montañas de la cordillera Central, condiciona un patrón de urbanización lineal y una densificación predominante en sentido norte–sur. El clima es

ANÁLISIS MULTITEMPORAL COMPARATIVO DE LA EXPANSIÓN URBANA (1984-2025) EN EL VALLE DE ABURRÁ Y EL ALTIPLANO DEL ORIENTE ANTIOQUEÑO

templado húmedo, con temperaturas medias anuales entre 20 y 24 °C y una marcada influencia orográfica sobre los regímenes de precipitación.

El Altiplano del Oriente Antioqueño (AOA), también conocido como Valle de San Nicolás, se localiza al oriente del AMVA y abarca los municipios de Rionegro, Marinilla, El Carmen de Viboral, Guarne, La Ceja, El Retiro, San Vicente Ferrer y La Unión. Su extensión conjunta supera los 1.200 km², con altitudes entre 2.000 y 2.300 m s. n. m., clima templado frío y una topografía ondulada que alterna valles agrícolas con laderas forestadas. Esta región constituye una plataforma estructural de gran relevancia hídrica, atravesada por las cuencas de los ríos Negro, La Pereira y Pantanillo, fundamentales para el abastecimiento de agua del oriente antioqueño y parte del AMVA.

Ambos territorios están articulados por una red de infraestructura vial estratégica principalmente la Autopista Medellín–Bogotá y el Túnel de Oriente que facilita los flujos diarios de población, mercancías y servicios. Esta conectividad ha intensificado los procesos de urbanización y expansión industrial, especialmente en los municipios de Rionegro y Guarne, que actúan como extensión funcional del sistema metropolitano. El contraste entre el valle densificado del Aburrá y el altiplano en proceso de expansión convierte a este par territorial en un laboratorio geográfico ideal para analizar la evolución y los efectos del crecimiento urbano sobre la estructura ecológica, el uso del suelo y la sostenibilidad regional.

3.3. Diseño general del modelo metodológico

El desarrollo del estudio se apoya en un modelo analítico estructurado en fases secuenciales y complementarias, orientadas a garantizar la consistencia y replicabilidad del proceso. A partir de los principios de la teledetección y el análisis espacial, se propuso una cadena metodológica adaptada, denominada **Model LUMACHain** (*Land Use Multitemporal Analysis Chain*), que integra los entornos de Google Earth Engine, Google Colab y ArcGIS Pro. Este modelo combina el procesamiento en la nube con análisis locales, permitiendo la automatización de tareas, la trazabilidad de los resultados y la comparación de las dinámicas urbanas entre el Valle de Aburrá y el Altiplano del Oriente Antioqueño. A continuación, se describen sus seis fases principales:

ANÁLISIS MULTITEMPORAL COMPARATIVO DE LA EXPANSIÓN URBANA (1984-2025) EN EL VALLE DE ABURRÁ Y EL ALTIPLANO DEL ORIENTE ANTIOQUEÑO

Fase 0. Validación de la cobertura base (GoogleEarthEngine)

Corresponde al diagnóstico inicial de las imágenes Landsat entre 1984 y 2025. En esta fase se revisó la disponibilidad temporal, la cobertura nubosa y la consistencia radiométrica, descartando escenas con interferencias o anomalías espectrales. El resultado fue un inventario depurado de escenas válidas por periodo y año de análisis, base para la generación de mosaicos.

Fase 1. Composición multibanda y mosaicos por periodo (GoogleEarthEngine)

A partir de las escenas validadas, se generaron composiciones multibanda en formato Landsat Surface Reflectance, agrupadas por intervalos multianuales. Cada mosaico se construyó con estadística de mediana, integrando bandas reflectivas (2 a 7) y aplicando máscaras de nubes y sombras. Los productos se exportaron a Google Drive en proyección uniforme (UTM 18N) y resolución de 30 m.

Fase 2. Cálculo de índices espectrales (GoogleColab)

Los mosaicos fueron procesados en Python (Google Colab) para generar los índices NDVI, NDWI, NDBI, IBI y MNDWI, normalizados entre 0–1. Esta etapa permitió resaltar coberturas vegetales, cuerpos de agua y áreas construidas, constituyendo insumos esenciales para la clasificación.

NDVI (Normalized Difference Vegetation Index)

$$\text{NDVI} = \frac{\text{NIR} - \text{Red}}{\text{NIR} + \text{Red}}$$

SAVI (Soil-Adjusted Vegetation Index, $L \approx 0.5$)

$$\text{SAVI} = \frac{(\text{NIR} - \text{Red})}{(\text{NIR} + \text{Red} + L)} (1 + L)$$

ANÁLISIS MULTITEMPORAL COMPARATIVO DE LA EXPANSIÓN URBANA (1984-2025) EN EL VALLE DE ABURRÁ Y EL ALTIPLANO DEL ORIENTE ANTIOQUEÑO

Usando $L=0.5$ Valor Standart, pero ajustable

MNDWI (Modified Normalized Difference Water Index)

$$\text{MNDWI} = \frac{\text{Green} - \text{SWIR1}}{\text{Green} + \text{SWIR1}}$$

NDBI (Normalized Difference Built-up Index)

$$\text{NDBI} = \frac{\text{SWIR1} - \text{NIR}}{\text{SWIR1} + \text{NIR}}$$

Fase 3. Clasificación supervisada (GoogleColab)

Clasificación urbano –no urbano por reglas adaptativas

Se programó un script en Python para ejecutar una clasificación rule-based con umbrales adaptativos y separar urbano y no urbano, evitando cortes fijos que no capturan variaciones estacionales, radiométricas y contextuales entre escenas y municipios. El flujo calcula índices espectrales habituales para detección de lo construido y sus complementos: NDBI e IBI para tejido edificado (Zha, Gao y Ni, 2003; He, Shi, Xie y Zhao, 2010), MNDWI para cuerpos de agua (Xu, 2006) y NDVI para vegetación (Rouse, Haas, Schell y Deering, 1974); adicionalmente aplica una máscara de pendientes para restringir falsos positivos en laderas pronunciadas, práctica común en mapeo urbano y riesgo (Montgomery y Dietrich, 1994).

Los umbrales adaptativos se estiman automáticamente por percentiles por periodo y por sub-área (AMVA y AOA). Para cada índice, el script toma el percentil p sobre píxeles sin nubes y etiqueta candidatos urbanos cuando NDBI o IBI superan $P60$ – $P70$; excluye vegetación cuando $\text{NDVI} \geq P60$ y agua cuando $\text{MNDWI} \geq P60$ y NDVI para vegetación (Rouse et al., 1974), complementado con SAVI para mitigar el efecto de fondo de suelo en coberturas ralas (Huete, 1988), combinando las evidencias mediante una regla de votación simple. Este enfoque de umbralado guiado por la

ANÁLISIS MULTITEMPORAL COMPARATIVO DE LA EXPANSIÓN URBANA (1984-2025) EN EL VALLE DE ABURRÁ Y EL ALTIPLANO DEL ORIENTE ANTIOQUEÑO

distribución evita supuestos fuertes y se alinea con prácticas de selección de umbral basadas en estadística de la imagen (Otsu, 1979; Jenks, 1967). Además, se enmascaran pendientes mayores a 35–40% para reducir confusiones en afloramientos y laderas inestables (Montgomery y Dietrich, 1994).

Para mitigar sesgos radiométricos entre periodos y sensores, los percentiles se recalculan en cada ventana temporal y sub-región. El script incluye una prueba de sensibilidad que desplaza los cortes ± 5 puntos percentiles y reporta variaciones en exactitud global menores a 2–3 puntos porcentuales y estabilidad espacial de los focos de expansión. La validación se ejecuta frente a WSF2015 y WorldCover 2021, además de GHSL, usando OA, F1, IoU y kappa (Marconcini et al., 2020; Zanaga et al., 2021; Pesaresi et al., 2016; Cohen, 1960; Powers, 2011; Jaccard, 1912), observándose mejor acuerdo en los periodos recientes con WSF y WorldCover por su resolución y fecha de referencia.

Con base en las capas de índices y muestras de entrenamiento derivadas de interpretación visual y datos de referencia, se ejecutó una clasificación supervisada tipo Random Forest, delimitando coberturas urbano / no urbano. El proceso incluyó validación interna mediante matriz de confusión y ajuste iterativo de parámetros.

Clasificación por reglas adaptativas

Umbrales usados en las máscaras ráster por periodo

UrbC igual 1 si $NDBI \geq 0.10$ y $NDVI \leq 0.25$ y $MNDWI \leq 0.05$ y $SLOPE \leq 25$ grados en otro caso 0

AguaC igual 1 si $MNDWI \geq 0.20$ y $NDVI \leq 0.10$ en otro caso 0

VegC igual 1 si $NDVI \geq 0.40$ o $SAVI \geq 0.50$ si SAVI existe en otro caso 0

SueloC igual 1 si $NDVI > 0.10$ y $NDVI < 0.35$ y $MNDWI < 0.00$ y $NDBI > -0.10$ y $NDBI < 0.20$ en otro caso 0

SombraC igual 1 si $SLOPE \geq 30$ grados y $NDVI \leq 0.15$ y $MNDWI < 0.00$ en otro caso 0

Puntaje de urbaneidad

**ANÁLISIS MULTITEMPORAL COMPARATIVO DE LA EXPANSIÓN URBANA (1984-2025)
EN EL VALLE DE ABURRÁ Y EL ALTIPLANO DEL ORIENTE ANTIOQUEÑO**

Reescalados internos
 $NDBI_{pos} = (NDBI + 1) / 2$
 $NDVI_{inv} = 1 - ((NDVI + 1) / 2)$
 $MNDWI_{inv} = 1 - ((MNDWI + 1) / 2)$
 $SLOPE_{pen} = \text{minimo} (SLOPE / 45, 1)$

$UrbScore = 100 * (0.50 * NDBI_{pos} + 0.30 * NDVI_{inv} + 0.20 * MNDWI_{inv} - 0.10 * SLOPE_{pen})$

Fusión multicategoría (CLS)

- Se crea una capa CLS por prioridad secuencial:
 Agua (1) → Urbano (5) → Vegetación (3) → Suelo (4) → Sombra (2) → 0 si nada aplica.
- La máscara final es la unión de las máscaras de insumo: donde falte dato en cualquiera relevante, queda NoData.

Estos umbrales son globales y ajustables; se aplicaron iguales a todos los períodos.

Tabla 4. Resumen Reglas adaptativas y umbrales de Clasificación Elaboración propia ArcGISPro; Excel; Entornos Python.

Índice / capa	Regla (ejemplo)	Tipo de regla	Justificación breve
NDBI	$NDBI \geq P70$ (por periodo y sub-área)	Inclusión urbana	Zonas construidas elevan reflectancia SWIR sobre NIR (Zha et al., 2003).
IBI	$IBI \geq P65$	Inclusión urbana	Índice compuesto que refuerza señal de lo construido (He et al., 2010).
NDVI	$NDVI \geq P60$	Exclusión	Vegetación alta no urbano; controla falsos positivos.
MNDWI	$MNDWI \geq P60$	Exclusión	Agua y humedales fuera de urbano (Xu, 2006).
SAVI (L=0.5)	$SAVI \geq P60$	Exclusión	Reduce el sesgo del fondo de suelo en vegetación rala; baja falsos positivos en áreas desnudas (Huete, 1988).
Pendiente	Slope > 35–40% → no urbano	Exclusión	Minimiza confusión en laderas inestables.
Nubes/sombra	QA máscara → no clasificar	Limpieza	Evita ruido radiométrico.

Fase 4. Binarización y depuración de resultados (GoogleColab)

ANÁLISIS MULTITEMPORAL COMPARATIVO DE LA EXPANSIÓN URBANA (1984-2025) EN EL VALLE DE ABURRÁ Y EL ALTIPLANO DEL ORIENTE ANTIOQUEÑO

Los mapas clasificados fueron convertidos en capas binarias (urbano = 1; no urbano = 0) y filtrados mediante operaciones morfológicas y estadísticas para eliminar ruido espectral o píxeles no deseados. Esta depuración garantizó continuidad espacial y homogeneidad en los límites de las coberturas urbanas.

Fase 5. Estadísticas zonales y representación geoespacial (GoogleColab)

Finalmente, las capas binarias se integraron para calcular métricas zonales por municipio y subregión: superficie urbana total, variación porcentual por periodo y centroides de expansión. Los resultados fueron representados cartográficamente mediante mapas comparativos de crecimiento y gráficos de tendencia multitemporal.

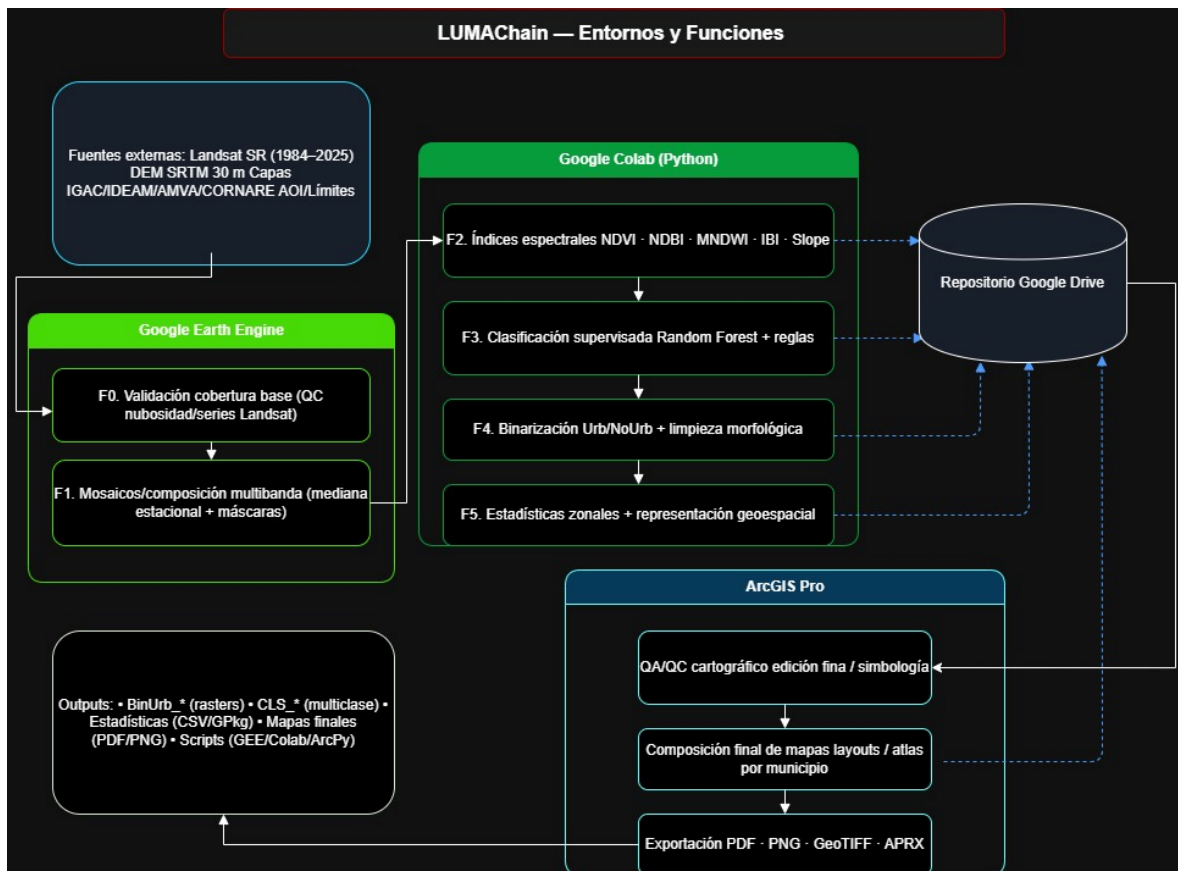


Imagen 3. Esquema gráfico del Model_LUMACHain_ Elaboración propia ArcGISPro.

ANÁLISIS MULTITEMPORAL COMPARATIVO DE LA EXPANSIÓN URBANA (1984-2025) EN EL VALLE DE ABURRÁ Y EL ALTIPLANO DEL ORIENTE ANTIOQUEÑO

3.4. Fuentes de información y datos empleados

La investigación se fundamentó en el uso de imágenes satelitales ópticas obtenidas de los sensores de la misión Landsat, administrada conjuntamente por la NASA y el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS). Se emplearon productos de reflectancia de superficie (Surface Reflectance) de las series Landsat 5 TM, Landsat 7 ETM+ y Landsat 8–9 OLI, disponibles a través de la plataforma Google Earth Engine. Estos sensores ofrecen una resolución espacial de 30 metros, cobertura multiespectral en las bandas del visible, infrarrojo cercano y de onda corta, y una resolución temporal de 16 días, lo que garantiza una base homogénea y continua para el análisis de largo plazo. La serie seleccionada abarca el periodo 1984–2025, permitiendo construir una secuencia temporal coherente con los hitos de transformación urbana observados en el Valle de Aburrá y el Altiplano del Oriente Antioqueño.



Imagen 4. Representación gráfica serie de satélites LandSat _ Elaboración propia IA.

Complementariamente, se integraron datos de elevación del Modelo Digital de Terreno SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) con resolución de 30 m, empleados para generar productos derivados de pendiente y altitud que apoyaron la interpretación espacial de las coberturas.

ANÁLISIS MULTITEMPORAL COMPARATIVO DE LA EXPANSIÓN URBANA (1984-2025) EN EL VALLE DE ABURRÁ Y EL ALTIPLANO DEL ORIENTE ANTIOQUEÑO

Asimismo, se incorporaron capas vectoriales oficiales de límites municipales, red hidrográfica y coberturas de referencia provenientes del Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC), el IDEAM y las Corporaciones Autónomas Regionales (AMVA y CORNARE), estandarizadas en el sistema de coordenadas MAGNA-SIRGAS / UTM Zona 18N.

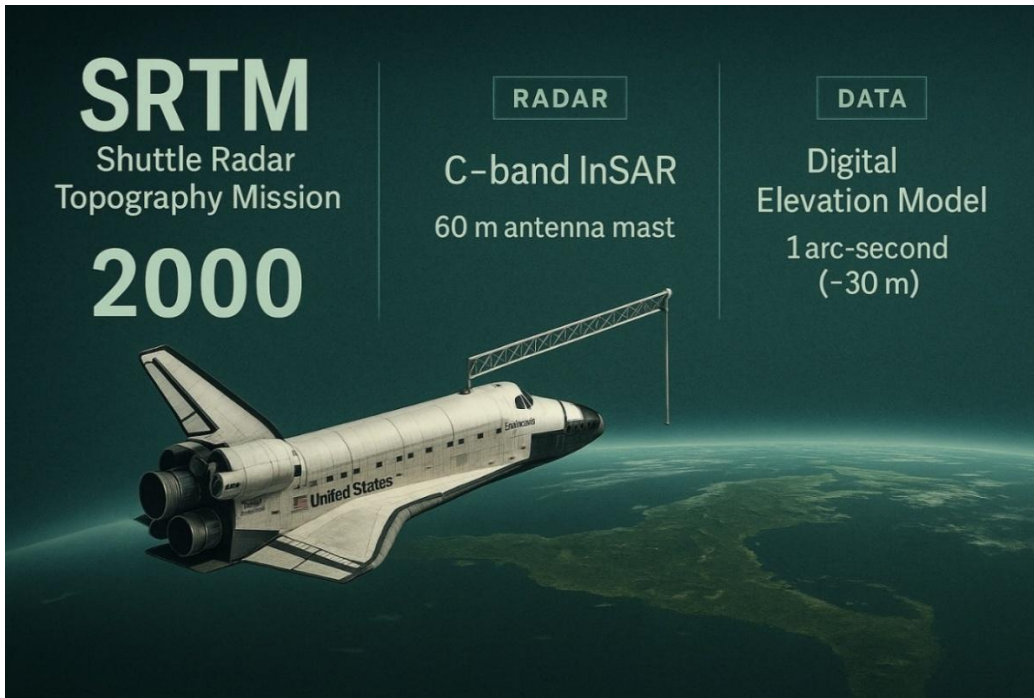


Imagen 5. Representación gráfica misión SRTM _ Elaboración propia IA.

Estas fuentes garantizan consistencia radiométrica, continuidad temporal y compatibilidad espacial, elementos esenciales para la replicabilidad del modelo multitemporal aplicado en este estudio.

4. Resultados

4.1. Resultados generales del modelo

4.1.1. Generación y descarga de información base

ANÁLISIS MULTITEMPORAL COMPARATIVO DE LA EXPANSIÓN URBANA (1984-2025) EN EL VALLE DE ABURRÁ Y EL ALTIPLANO DEL ORIENTE ANTIOQUEÑO

Se construyó una serie histórica de imágenes Landsat (TM, ETM+ y OLI) para el periodo 1984–2025, seleccionando años y rangos multianuales según la disponibilidad y calidad radiométrica (cobertura de nubes, ausencia de fallas SLC-off y continuidad temporal). Para cada periodo se generó un mosaico multianual y multibanda, compuesto a partir de estadísticas robustas (mediana/p25–p75) sobre escenas libres de nubes y sombras usando las bandas ópticas de cada sensor (TM/ETM+: B1–B5, B7; OLI: B2–B7). Los mosaicos fueron corregidos a reflectancia de superficie, armonizados entre sensores y recortados al AOI (AMVA y AOA). El resultado es una pila temporal consistente que garantiza comparabilidad interanual e intersensor para los análisis posteriores.

**ANÁLISIS MULTITEMPORAL COMPARATIVO DE LA EXPANSIÓN URBANA (1984-2025)
EN EL VALLE DE ABURRÁ Y EL ALTIPLANO DEL ORIENTE ANTIOQUEÑO**

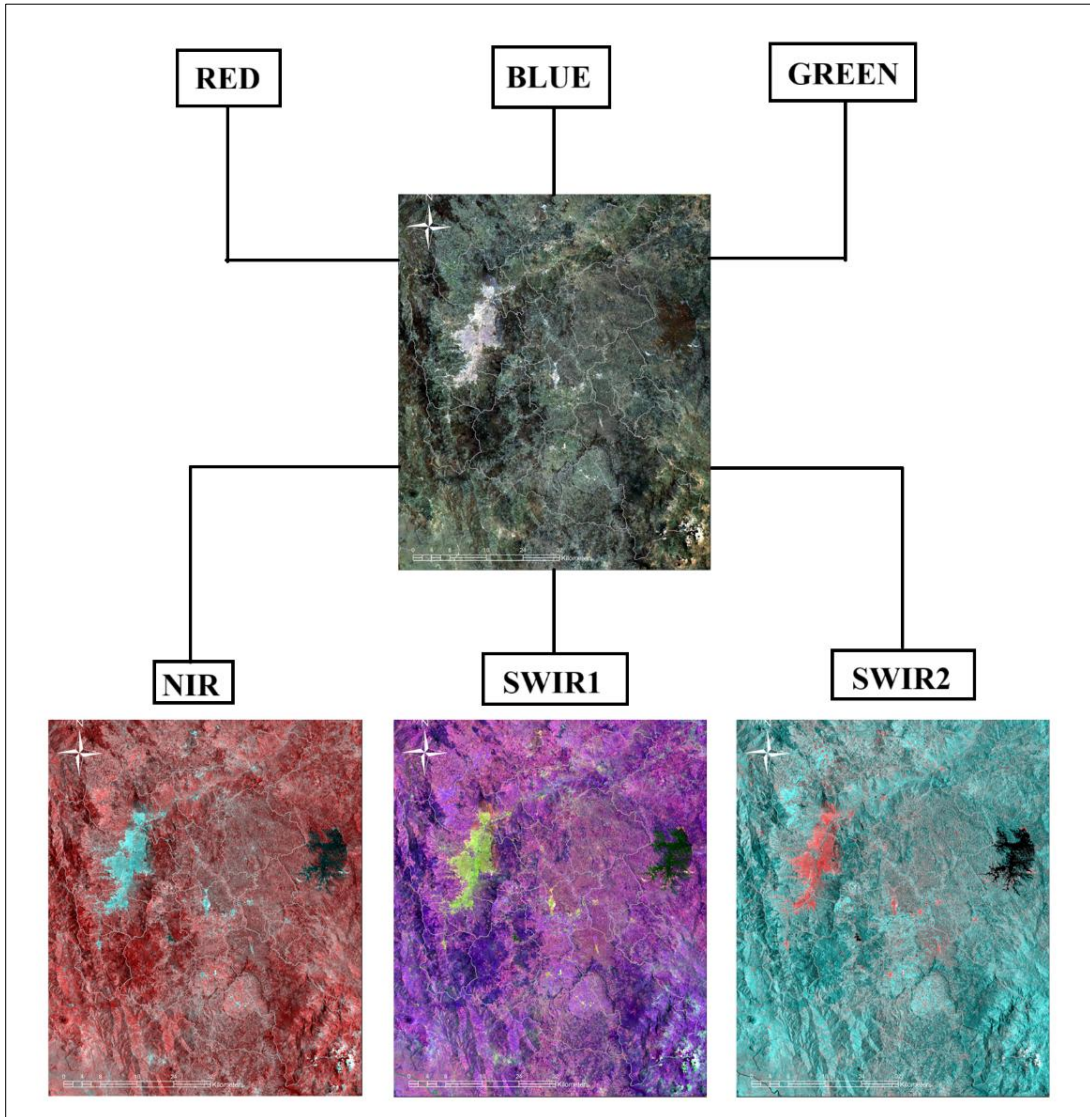


Imagen 6. Resultados fase 1. Composición de multibandas_Multianules_ Elaboración propia ArcGISPro y entornos Python.

4.1.2. Generación de índices normalizados

Sobre cada mosaico se calcularon índices espectrales estandarizados para capturar señales de vegetación, agua y tejido urbano: **NDVI** (vegetación y vigor fotosintético); **NDWI/MNDWI** según sensor (cuerpos de agua y humedad superficial); **NDBI** (intensidad del tejido construido); **IBI** (índice de construcción integrado, derivado de NDVI, MNDWI y NDBI); **SAVI** (vegetación

ANÁLISIS MULTITEMPORAL COMPARATIVO DE LA EXPANSIÓN URBANA (1984-2025) EN EL VALLE DE ABURRÁ Y EL ALTIPLANO DEL ORIENTE ANTIOQUEÑO

con corrección de brillo del suelo, en áreas semiurbanas). Todos los índices se **normalizaron** a un rango común (z-score/0–1) para facilitar su combinación y comparación temporal.

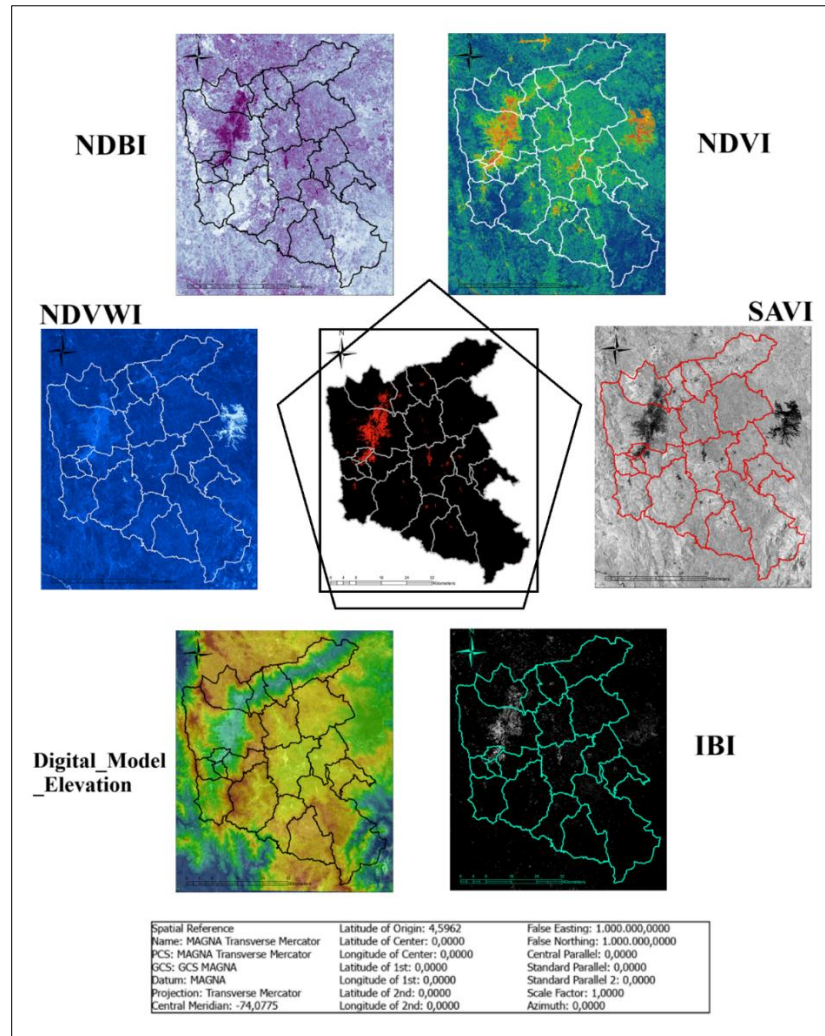


Imagen 7. Resultados fase 2 y 3. Composición de multibandas_IndicesNormalizados y parametrización de entornos de clasificación supervisada Random forest_ Elaboración propia ArcGISPro y entornos Python.

4.1.3. Reglas de clasificación supervisada (Random Forest)

La clasificación (urbano/no urbano) se realizó con Random Forest en cada periodo. Para automatizar y estabilizar el entrenamiento interanual, se generó una capa de muestras mediante reglas adaptativas basadas en umbrales dinámicos de los índices (p. ej., NDBI e IBI altos y NDVI bajo para “urbano”; NDVI/SAVI altos y NDBI bajo para “no urbano”), refinadas con máscaras

ANÁLISIS MULTITEMPORAL COMPARATIVO DE LA EXPANSIÓN URBANA (1984-2025) EN EL VALLE DE ABURRÁ Y EL ALTIPLANO DEL ORIENTE ANTIOQUEÑO

auxiliares (agua y pendientes altas). Con esas muestras, el modelo se entrenó por año empleando como predictores las bandas ópticas y los índices normalizados del periodo respectivo. El proceso corre de forma automática para todos los años, generando: (i) probabilidad urbana, (ii) clasificación multiclase y (iii) binarización urbana con umbral óptimo (Youden/ROC y verificación manual). Las salidas incluyen métricas de desempeño (OOB, matriz de confusión), y un postproceso de suavizado y depuración morfológica para eliminar píxeles anómalos.

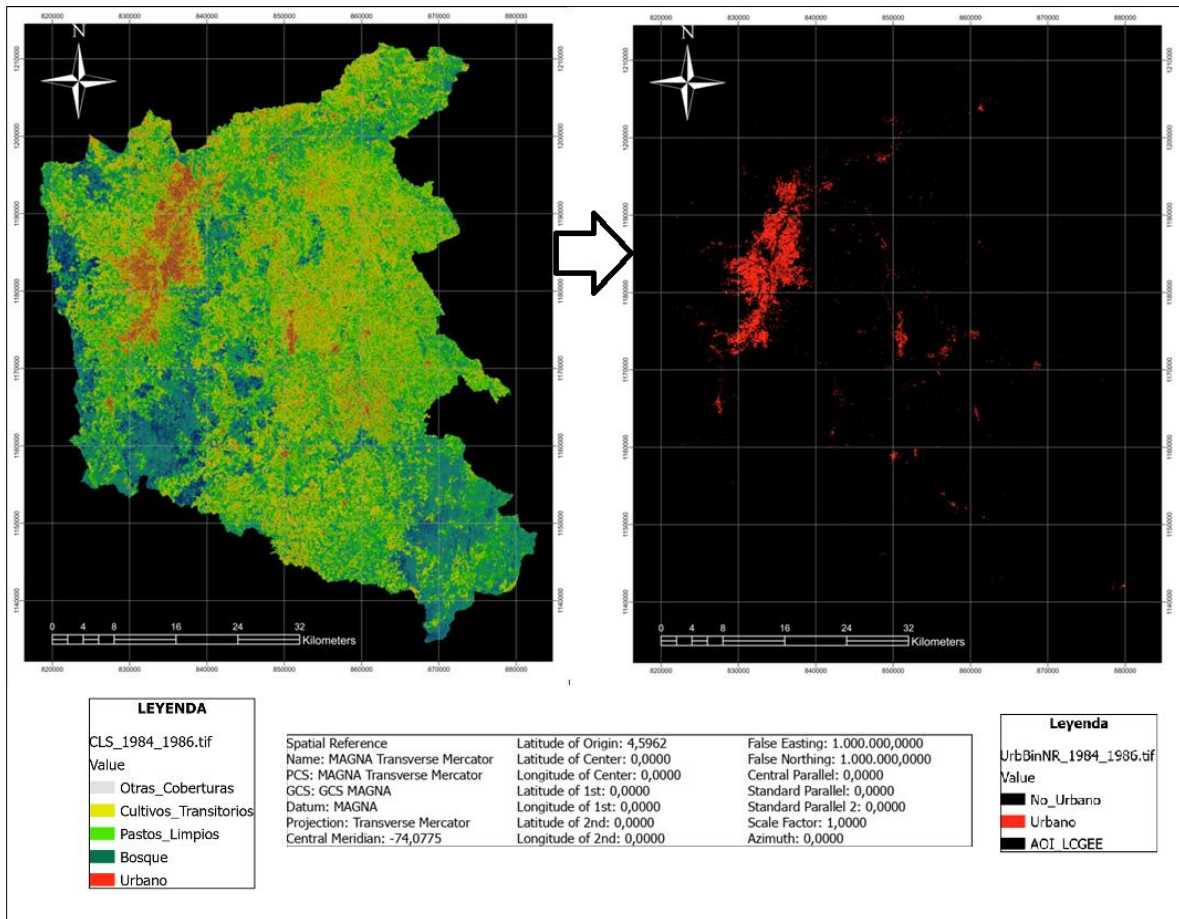


Imagen 8. Resultados fase 4 clasificación supervisada Random forest_ Procesamiento y binarización Urbano/NoUrbano_ Elaboración propia ArcGISPro y entornos Python.

4.2. Cobertura urbana histórica (1984–2025), resumen de la trayectoria general del crecimiento urbano.

**ANÁLISIS MULTITEMPORAL COMPARATIVO DE LA EXPANSIÓN URBANA (1984-2025)
EN EL VALLE DE ABURRÁ Y EL ALTIPLANO DEL ORIENTE ANTIOQUEÑO**

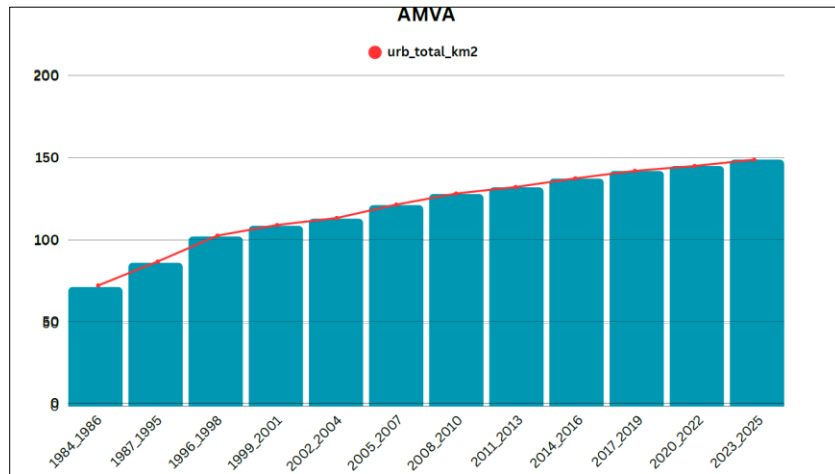
Se aprecia un aumento progresivo de la huella urbana en ambos sistemas, con trayectorias diferenciadas pero convergentes: en el AMVA (a) para el periodo inicial la expansión empieza con un patrón claramente concentrado en el corredor valle (núcleo Medellín–Bello–Itagüí–Envigado) y a medida que avanzan los periodos, se densifica y se cierran vacíos hasta conformar manchas continuas; en el AOA (b) la mancha urbana es más tardía pero acelerada en los últimos periodos, con la conformación de núcleos en las cabeceras de los municipios (Rionegro, La Ceja, El Retiro, Guarne) y posterior conexión por ejes viales, lo que sugiere integración funcional creciente con el AMVA. Estos patrones de densificación en el valle estrecho del Aburrá por condicionamiento topográfico, expansión por corredores y coalescencia periurbana hacia Oriente son consistentes con la evidencia reciente para el Valle de Aburrá y el eje Medellín–Rionegro, que documenta intensificación de coberturas construidas y reconfiguración del borde rural-metropolitano en las dos últimas décadas, incluso con enfoques SAR multitemporales que confirman la tendencia pese a nubosidad y relieve complejo.

Asimismo, el comportamiento “difusión–coalición” que se insinúa en los paneles es el esperado en la literatura de expansión urbana en Colombia y América Latina cuando las ciudades rebasan límites municipales y consolidan conurbaciones; estudios multi ciudad basados en Landsat (1990–2020) reportan trayectorias comparables [crecimiento periférico seguido de consolidación y densificación] (Rodríguez & Castaño, 2023).

Tabla 5. Resumen resultados Fase 5_ Estadísticas zonales AMVA_ Elaboración propia ArcGISPro; Excel; Entornos Python.

Estadísticas Zonales AMVA			
Periodo	Año_Inicio	Año_Final	urb_total_km2
1984_1986	1984	1986	71,9577
1987_1995	1987	1995	86,6106
1996_1998	1996	1998	102,4353
1999_2001	1999	2001	108,9018
2002_2004	2002	2004	113,184
2005_2007	2005	2007	121,3857
2008_2010	2008	2010	128,142
2011_2013	2011	2013	132,1074
2014_2016	2014	2016	137,4084
2017_2019	2017	2019	142,0074
2020_2022	2020	2022	144,9801
2023_2025	2023	2025	148,8411

ANÁLISIS MULTITEMPORAL COMPARATIVO DE LA EXPANSIÓN URBANA (1984-2025) EN EL VALLE DE ABURRÁ Y EL ALTIPLANO DEL ORIENTE ANTIOQUEÑO



Gráfica 4. Áreas totales urbanas por periodo_ AMVA_ Elaboración propia ArcGISPro; Excel; Entornos Python.

Las dos gráficas muestran un incremento sostenido del área urbana total: de ~72 km² (1984–1986) a ~149 km² (2023–2025), es decir, +77 km². Se observan saltos más marcados entre 1984–2004 y 2008–2014; desde 2017–2025 el crecimiento continúa, pero con pendiente algo menor, señal de progresiva saturación del valle consolidado. La línea roja suavizada acompaña las barras confirmando la tendencia ascendente y la estabilización relativa al final de la serie.

ANÁLISIS MULTITEMPORAL COMPARATIVO DE LA EXPANSIÓN URBANA (1984-2025) EN EL VALLE DE ABURRÁ Y EL ALTIPLANO DEL ORIENTE ANTIOQUEÑO

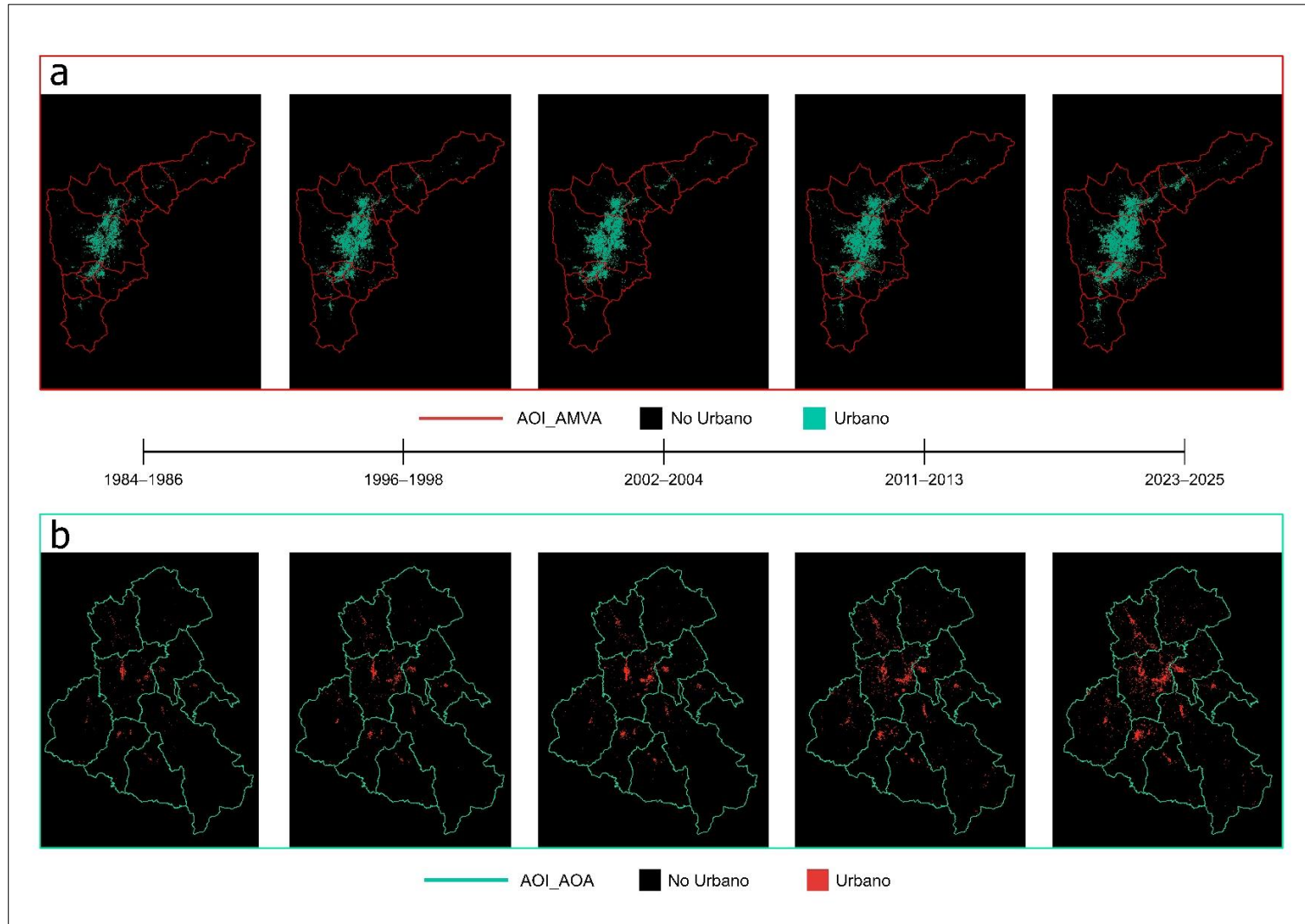
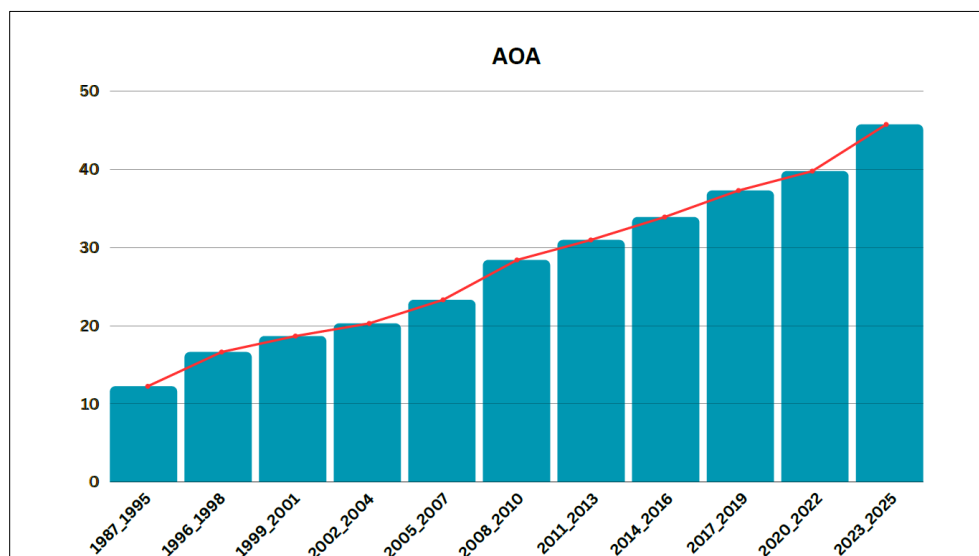


Imagen 9. Huella urbana binaria (Urbano/No Urbano) para (a) AMVA y (b) AOA en cinco periodos: 1984-1986, 1996-1998, 2002-2004, 2011-2013 y 2023-2025. Base Landsat SR (30 m). Elaboración propia ArcGISPro y entornos Python.

Tabla 6. Resumen resultados Fase 5_ Estadísticas zonales AOA_ Elaboración propia ArcGISPro; Excel; Entornos Python.

Estadísticas Zonales AOA			
Periodo	Año_Inicio	Año_Final	urb_total_km2
1987_1995	1987	1995	12,2418
1996_1998	1996	1998	16,6257
1999_2001	1999	2001	18,6678
2002_2004	2002	2004	20,2869
2005_2007	2005	2007	23,3028
2008_2010	2008	2010	28,4004
2011_2013	2011	2013	30,96
2014_2016	2014	2016	33,894
2017_2019	2017	2019	37,2843
2020_2022	2020	2022	39,7683
2023_2025	2023	2025	45,738

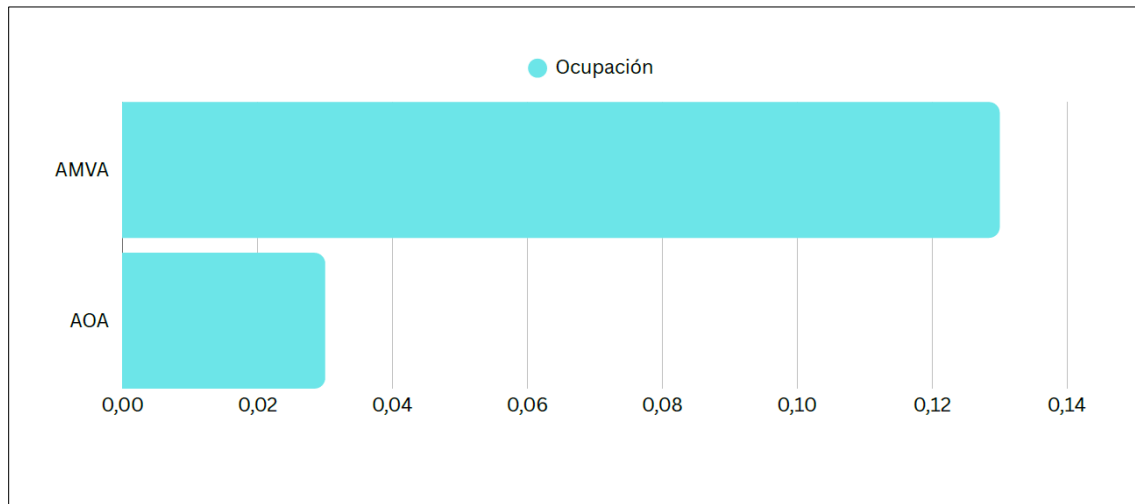


Gráfica 5. Áreas totales urbanas por periodo_ AOA_ Elaboración propia ArcGISPro; Excel; Entornos Python.

Las gráficas evidencian una trayectoria ascendente del área urbana: de ~12,2 km² (1987–1995) a ~45,7 km² (2023–2025), +33,5 km². Tras incrementos moderados hasta 2010, la pendiente se acelera desde 2011–2013 y, sobre todo, entre 2014–2025, reflejando la expansión en cabeceras y bordes periurbanos. A diferencia del AMVA, la curva no muestra

señales claras de saturación espacial, sugiriendo disponibilidad de suelo para continuidad del crecimiento.

4.2.1. Indicador de ocupación urbana (2023–2025)



Gráfica 6. Modelo de ocupación por AOI_ Elaboración propia ArcGISPro; Excel; Entornos Python.

Tabla 7. Resultados Modelo de Ocupación por AOI_ Elaboración propia ArcGISPro; Excel; Entornos Python.

AOI	Periodo	Area_Total km2	Area_Urbana km2	Ocupación
AMVA	2023_2025	116283	148,8411	0,13
AOA	2023_2025	174306	45,738	0,03

La Tabla 6 y la Gráfica 6 resumen el indicador de ocupación urbana para el periodo 2023–2025, calculado como la razón entre el área urbana mapeada y el área total del AOI. El AMVA registra una ocupación de 0,13 (13 %), valor coherente con su patrón de conurbación y alta densificación sobre el corredor metropolitano; en contraste, el AOA presenta una ocupación de 0,03 (3 %), consistente con un tejido más disperso y una mayor disponibilidad de suelo no urbanizado. Esta diferencia cuantitativa respalda los hallazgos cartográficos previos: en el AMVA el crecimiento reciente se apoya en la continuidad urbana existente, mientras que en el AOA las expansiones tienden a configurarse como núcleos y frentes periurbanos más abiertos. El indicador se construyó sobre las capas finales binarizadas de

urbano/no-urbano 2023–2025 y el perímetro de cada AOI, por lo que es comparable entre regiones y puede emplearse como línea base para contrastar escenarios de expansión y restricciones (pendiente y proximidad hídrica) reportados en secciones anteriores.

4.3. Tendencias de cambio y tasas de crecimiento urbano

4.3.1. AMVA

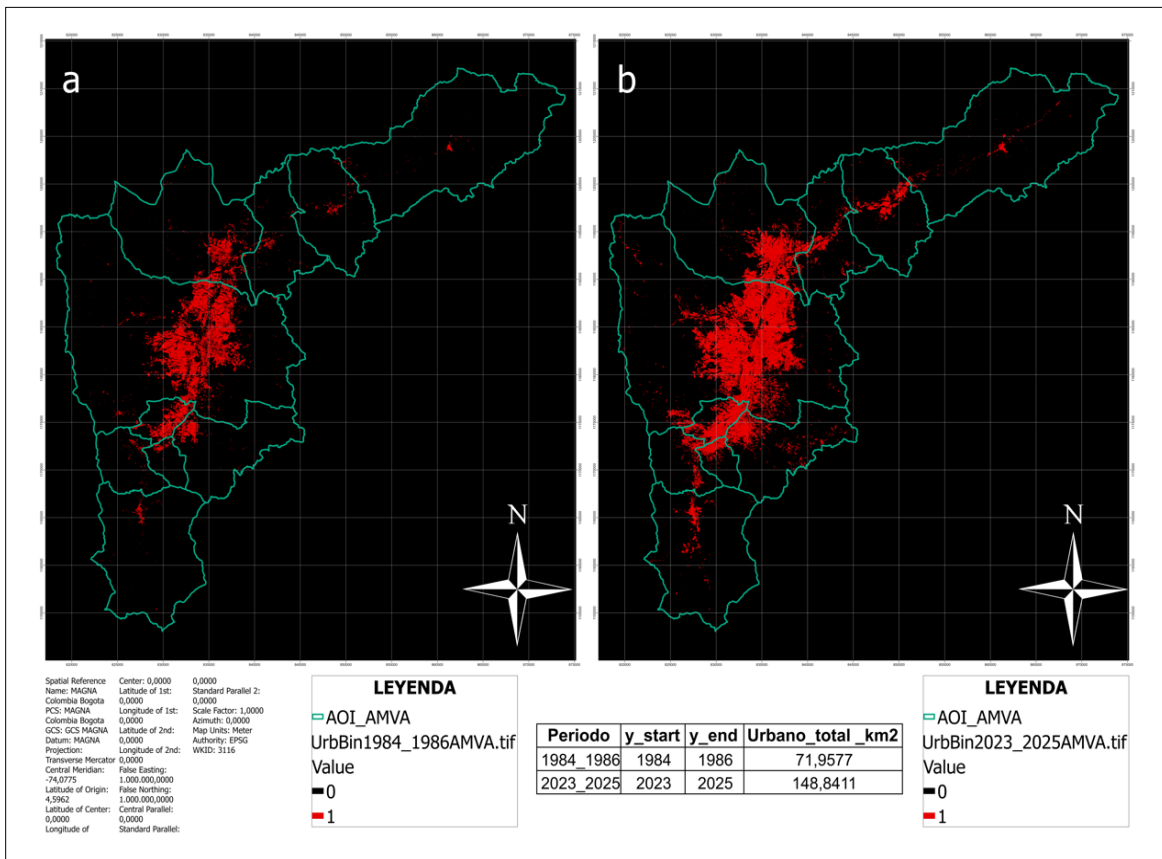


Imagen 10. Comparación huellas urbanas AMVA 1986 - 2025_ ArcGISPro y entornos Python.

La figura compara dos periodos de la huella urbana del AMVA. En el mapa (a) se observa la cobertura urbana inicial del estudio, 1984–1986, donde el rojo (valor 1) representa áreas construidas o cobertura artificial y el negro (valor 0) agrupa las demás coberturas; la mancha parte de núcleos consolidados, pero aún fragmentados, con vacíos y bordes irregulares a lo largo del eje del valle. En el mapa (b), 2023–2025, se evidencia una expansión considerable: los bordes periféricos crecen en torno a corredores viales y, sobre todo, aparece una densificación intensa hacia el interior, cerrando vacíos y generando grandes manchas continuas. Esta trayectoria es coherente con el marco institucional

**ANÁLISIS MULTITEMPORAL COMPARATIVO DE LA EXPANSIÓN URBANA
(1984-2025) EN EL VALLE DE ABURRÁ Y EL ALTIPLANO DEL ORIENTE**

metropolitano vigente desde 1980, cuando se configuró el Área Metropolitana del Valle de Aburrá para coordinar los diez municipios del valle en materia de planificación y servicios, lo que acompañó un proceso urbano que ya rebasaba límites municipales (Área Metropolitana del Valle de Aburrá, 1980). En los años ochenta y noventa la región enfrentó tensiones socioeconómicas con desindustrialización, violencia y presión demográfica, factores que explican la fragmentación inicial y la ocupación periférica en suelos de borde urbano rural (DANE, 1993; DNP, 2005). Desde 1995 la puesta en servicio del Metro de Medellín y, posteriormente, la red de Metrocables entre 2004 y 2008 reconfiguraron la accesibilidad, consolidaron centralidades y favorecieron la coalescencia de la mancha en zonas centrales y de ladera integradas al sistema de transporte masivo (Metro de Medellín, 1995; Metro de Medellín, 2004; Metro de Medellín, 2008). En la década de 2010, con la revisión del POT de Medellín de 2014 y lineamientos metropolitanos de ordenamiento, se reforzaron criterios de densificación y contención de expansión, lo que se refleja en el patrón más compacto observado en el periodo final (Alcaldía de Medellín, 2014; Área Metropolitana del Valle de Aburrá, 2016).

Tabla 8. Resultados Modelo de intensidad de cambio urbano AMVA_ Elaboración propia ArcGISPro; Excel; Entornos Python.

AOI	Municipio Nombre	urb_inicial (km2)	urb_final (km2)	delta (km2)	tasa_anual (km2)	INTENSIDAD
AMVA	Barbosa	0.759	2.226	1.467	0.038	baja
AMVA	Bello	8.84	20.99	12.15	0.312	muy_alta
AMVA	Caldas	0.91	3.416	2.506	0.064	media_baja
AMVA	Copacabana	1.221	4.485	3.263	0.084	media
AMVA	Envigado	3.37	9.753	6.383	0.164	muy_alta
AMVA	Girardota	0.946	5.139	4.193	0.108	media_alta
AMVA	Itagüí	6.375	10.741	4.366	0.112	media_alta
AMVA	La Estrella	0.646	3.589	2.943	0.075	media_baja
AMVA	Medellín	48.11	85.018	36.909	0.946	muy_alta
AMVA	Sabaneta	0.781	3.484	2.703	0.069	media_baja

4.3.2 Intensidad de cambio urbano 1986–2025 (AMVA)

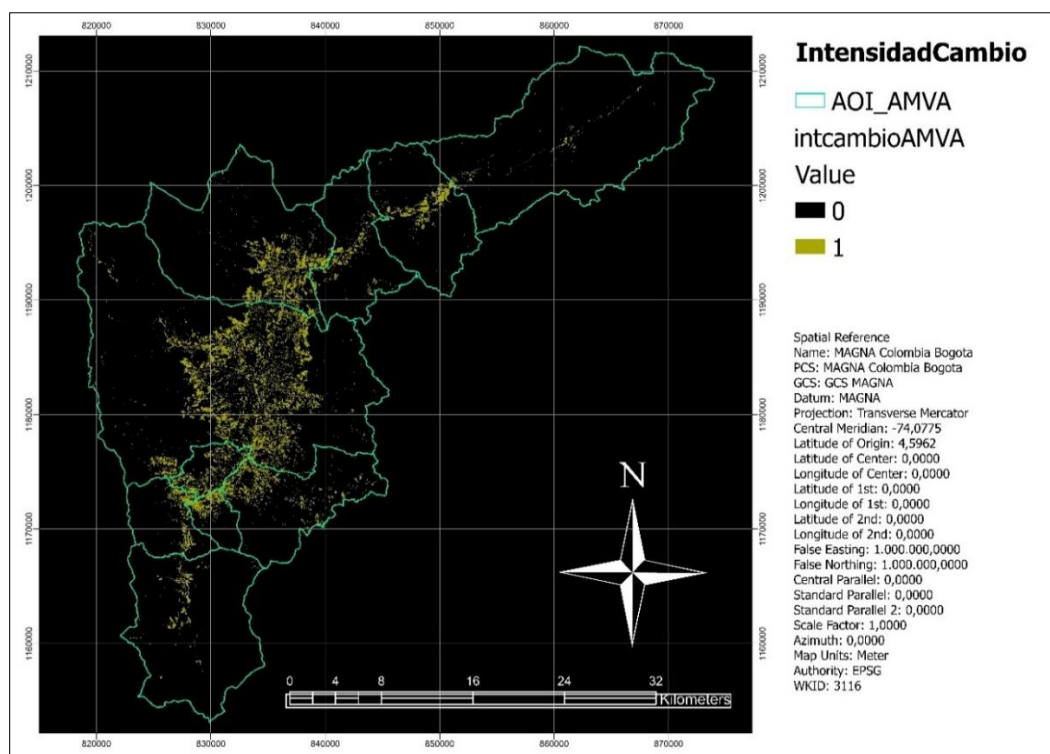
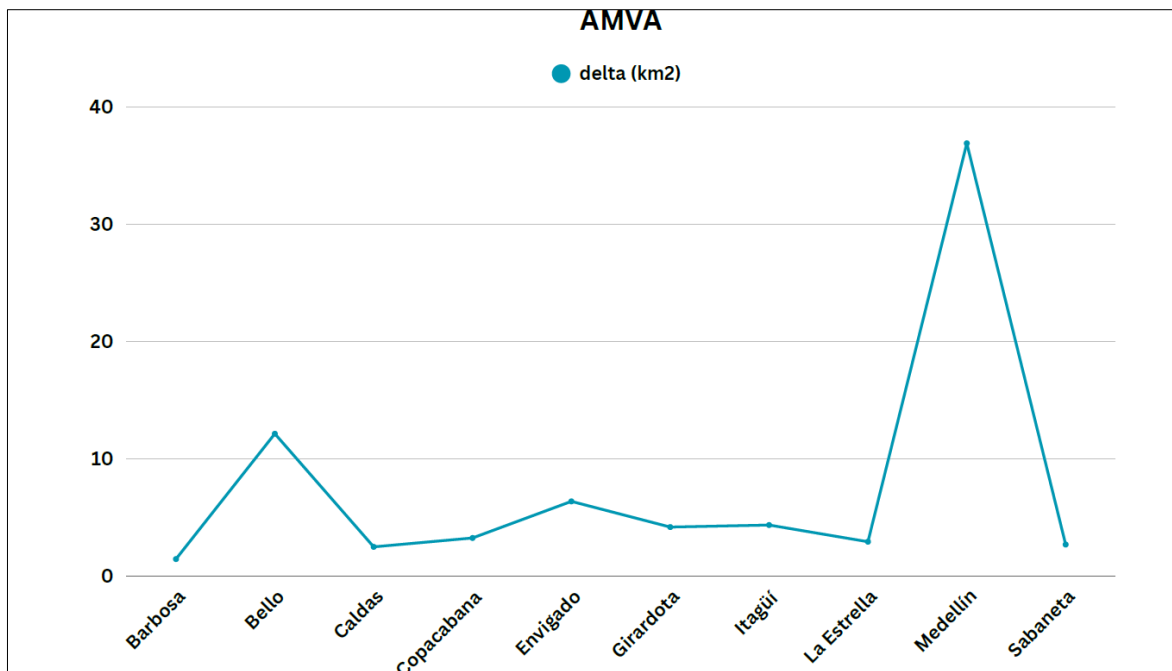


Imagen 11. Modelo de intensidad de cambio AMVA periodo 1986 - 2025_ ArcGISPro y entornos Python.

La figura presenta la capa de Cambio para el AMVA (contorno AOI_AMVA), donde el valor 1 (amarillo) identifica píxeles que en 1986 no eran urbanos, pero durante el periodo multitemporal analizado pasaron a urbano y se mantienen urbanos en el último corte; el valor 0 (negro) reúne lo que nunca cambió o no quedó estable. Este producto proviene de la cadena del modelo LUMACHain ya implementada: a partir de mosaicos Landsat de reflectancia de superficie se generaron índices (NDVI, NDWI/MNDWI, NDBI, IBI) y pendiente; luego, con la clasificación binaria urbano/no urbano por periodos y las reglas umbralizadas acordadas, se detectó el primer evento de conversión y se filtró por estabilidad (condición urbana persistente en 2023–2025), descartando falsos positivos y cambios transitorios. El patrón espacial evidencia densificación y coalescencia a lo largo del eje del río Medellín, con focos intensos en los corredores industriales y de servicios del centro–sur metropolitano (Itagüí–Envigado–Sabaneta–La Estrella) y expansiones norte hacia Bello–Copacabana–Girardota–Barbosa, además de trazas lineales asociadas a corredores viales y a planicies aluviales. En conjunto, el mapa sintetiza la huella de conversión efectiva de suelo no urbano a urbano

consolidado, útil para contrastar con POT/PBOT, estimar tasas de conversión, y priorizar evaluación de presiones sobre suelos de expansión y determinantes ambientales en los bordes metropolitanos.



Gráfica 7. Delta de cambio interperiodo_ AMVA_ Elaboración propia ArcGISPro; Excel; Entornos Python.

La gráfica “AMVA – Δ (km²)” resume la ganancia neta de superficie urbana por municipio entre periodos consecutivos (1984–2025). El patrón es altamente asimétrico: Medellín concentra el mayor incremento (≈ 40 – 45 km²), muy por encima del resto, lo que confirma su rol de foco primario de densificación y expansión. En un segundo nivel aparecen Sabaneta, Bello y Envigado con aumentos moderados (del orden de 6–12 km²), asociados a la continuidad del corredor sur y a procesos de consolidación en el norte. Municipios como Caldas, Copacabana, Girardota, Itagüí, La Estrella y Barbosa presentan crecimientos menores (≈ 1 – 5 km²), típicos de expansión periférica y rellenos intraurbanos. En conjunto, la distribución muestra un sistema metropolitano con fuerte gradiente centro-periferia y contribuciones diferenciales que explican la mayor parte del saldo urbano regional.

4.3.3. AOA

La figura muestra la huella urbana binaria del Altiplano del Oriente Antioqueño (AOA) en dos periodos: (a) situación base 1984–1986 y (b) estado reciente 2023–2025. El panel (a), evidencia una

**ANÁLISIS MULTITEMPORAL COMPARATIVO DE LA EXPANSIÓN URBANA
(1984-2025) EN EL VALLE DE ABURRÁ Y EL ALTIPLANO DEL ORIENTE**

urbanización discontinua y puntiforme, concentrada en núcleos principales y bordes inmediatos; el mapa (b), revela un patrón policéntrico con coalición entre núcleos, mayor continuidad sobre corredores viales y expansión periférica en planicies y laderas suaves. La síntesis cuantitativa indica un paso de ~9,96 km² (1984–1986) a ~45,74 km² (2023–2025), es decir, un aumento neto ≈ +35,78 km² y una multiplicación ~4,6× de la superficie urbana en el periodo. Estos productos provienen de los mosaicos Landsat SR, índices (NDVI, MNDWI/NDWI, NDBI, IBI) y pendiente, clasificados en urbano/no urbano por ventanas temporales y validados reglas umbralizadas adaptativas; por ello, el contraste a–b no mezcla “potenciales” sino urbanización efectiva y estable al final del horizonte, útil para el balance municipal, la verificación con POT/PBOT y la identificación de bordes de presión sobre suelos de expansión y determinantes ambientales.

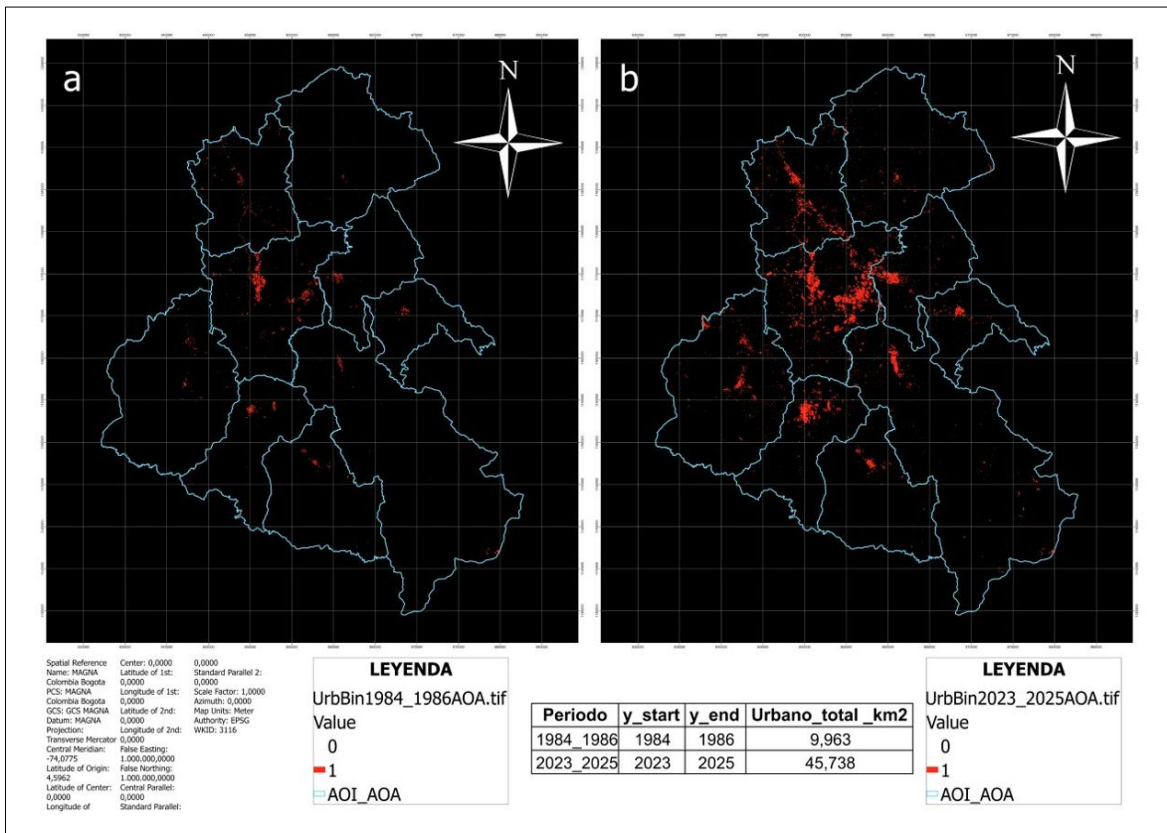


Imagen 12. Comparación huellas urbanas AOA 1986 - 2025_ ArcGISPro y entornos Python.

Tabla 9. Resultados Modelo de intensidad de cambio urbano AOA_ Elaboración propia ArcGISPro; Excel; Entornos Python.

AOI	Municipio Nombre	urb_inicial (km2)	urb_final (km2)	delta (km2)	tasa_anual (km2)	INTENSIDAD
-----	---------------------	----------------------	--------------------	----------------	---------------------	------------

**ANÁLISIS MULTITEMPORAL COMPARATIVO DE LA EXPANSIÓN URBANA
(1984-2025) EN EL VALLE DE ABURRÁ Y EL ALTIPLANO DEL ORIENTE**

AOI	Carmen De Viboral	0.724	4.236	3.512	0.09	media
AOI	El Retiro	0.635	3.894	3.259	0.084	media
AOI	Guarne	1.318	6.356	5.038	0.129	media_alta
AOI	La Ceja	0.888	4.769	3.881	0.1	media_alta
AOI	La Unión	0.523	1.471	0.948	0.024	baja
AOI	Marinilla	0.662	3.847	3.184	0.082	media_baja
AOI	Rionegro	4.518	17.748	13.23	0.339	muy_alta
AOI	San Vicente	0.277	1.895	1.618	0.041	baja
AOI	Santuario	0.417	1.522	1.105	0.028	baja

4.3.4 Intensidad de cambio urbano 1986–2025 (AOA)

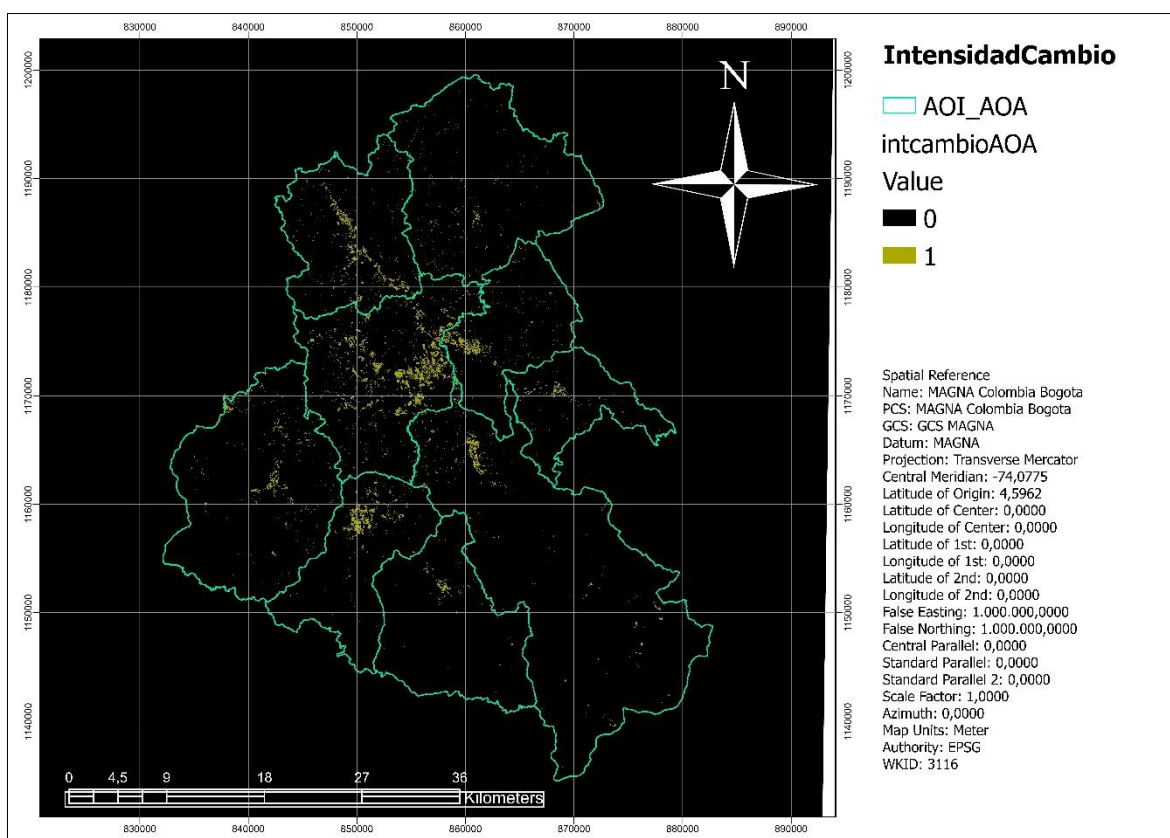
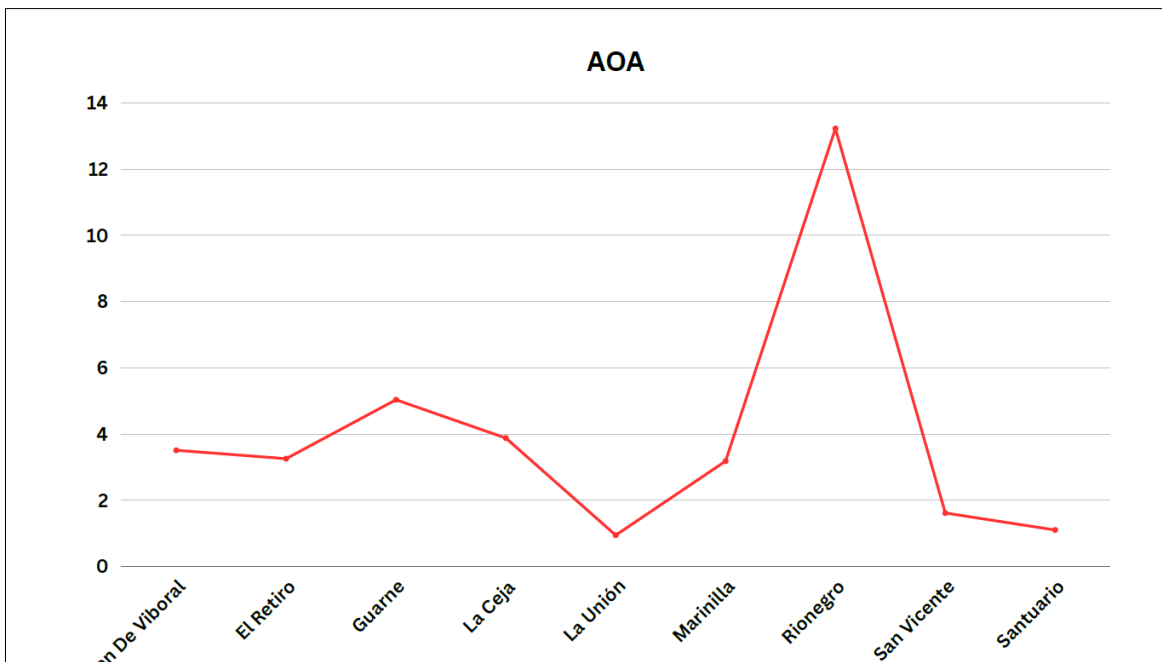


Imagen 13. Modelo de intensidad de cambio AOA periodo 1986 - 2025_ ArcGISPro y entornos Python.

La figura muestra la capa Cambio para el Altiplano del Oriente Antioqueño: los píxeles con valor 1 (amarillo) corresponden a áreas que no eran urbanas en 1986, pero que en algún momento del periodo

multitemporal se transformaron a urbano y permanecen urbanas al corte 2023–2025; el valor 0 (negro) agrupa superficies sin conversión efectiva o no consolidadas al final. Este producto es consistente con mosaicos Landsat de reflectancia de superficie → índices (NDVI, MNDWI/NDWI, NDBI, IBI) y pendiente → clasificación binaria por ventanas temporales → reglas umbralizadas adaptativas y filtro de estabilidad para descartar cambios transitorios. El patrón resultante confirma una urbanización policéntrica con focos de conversión alrededor de cabeceras municipales del corredor central del altiplano y trazas lineales asociadas a ejes viales y planicies interandinas, evidenciando procesos de coalescencia entre núcleos y expansión en laderas suaves. El mapa sintetiza la huella de conversión estable útil para contrastar con POT/PBOT, estimar tasas de conversión y priorizar la gestión de bordes de expansión frente a determinantes ambientales y suelos rurales estratégicos.



Gráfica 8. Delta de cambio interperiodo_ AOA_ Elaboración propia ArcGISPro; Excel; Entornos Python.

En el AOA, la variación de área urbana ($\Delta \text{ km}^2$) por municipio muestra una concentración marcada del crecimiento en Rionegro, con el máximo de la serie ($\approx 13\text{--}14 \text{ km}^2$), seguido a distancia por Guarne ($\approx 5 \text{ km}^2$) y La Ceja ($\approx 4 \text{ km}^2$). Marinilla y El Carmen de Viboral exhiben incrementos intermedios, configurando un corredor central de expansión, mientras que San Vicente y Sonsón presentan aumentos bajos ($\approx 1\text{--}2 \text{ km}^2$). El perfil es claramente asimétrico: uno o dos polos dominantes y una periferia de crecimiento moderado a bajo, consistente con los patrones de accesibilidad vial y atracción de actividades económicas del valle de San Nicolás. Esta distribución sugiere presión fuerte

de densificación y conurbación en el eje Rionegro–Guarne–La Ceja y necesidades de control del consumo de suelo en bordes rurales adyacentes.

4.4. Identificación de núcleos y corredores de expansión AOI general (AMVA + AOA)

La superficie Kernel Density de Cambios periodo (1984–2025) revela un sistema urbano integrado con dos comportamientos complementarios. En el AMVA, los máximos (clases Intenso/Muy_Intenso) se concentran en el fondo de valle y terrazas aluviales del eje N–S del río Medellín, con rellenos intraurbanos, sustitución tipológica y coalescencia entre núcleos contiguos (Medellín–Itagüí–Envigado–Sabaneta–La Estrella), más un frente lineal hacia Bello–Copacabana–Girardota–Barbosa. Allí, la densidad alta se alinea con corredores troncales, estaciones de centralidad y franjas de pendiente baja a media, mientras que las laderas fuertes quiebran la continuidad y canalizan el crecimiento en lenguas a lo largo de las vías.

En el AOA, el patrón es policéntrico: núcleos Intenso/Muy_Intenso alrededor de Rionegro (influencia aeroportuaria y de servicios) y La Ceja, conectados por corredores Medio–Intenso hacia Marinilla y El Retiro, además del eje Guarne–Rionegro como línea logística con el AMVA. La densidad decrece a Bajo/Muy_Bajo en bordes y laderas más marcadas, donde la topografía filtra la expansión y obliga a la conectividad por planicies interandinas.

En conjunto, el gradiente (Muy_Bajo→Muy_Intenso) no solo indica cuánto cambió, sino cómo se organiza el sistema: (i) centros compactos y coalescentes en el AMVA; (ii) corredores de articulación e islas densas que prefiguran futuras coalescencias en el AOA; y (iii) halos periféricos de presión incipiente. Para la gestión, las clases Intenso/Muy_Intenso priorizan control de borde urbano y protección de rondas; las Medio definen corredores donde anticipar infraestructura y normas de transición; y Bajo/Muy_Bajo actúan como zonas de contención para evitar ocupación dispersa y conflictos en suelo rural estratégico. Esta lectura integrada respalda la verificación con POT/PBOT y la jerarquización de intervenciones en los frentes más presionados de ambas subregiones

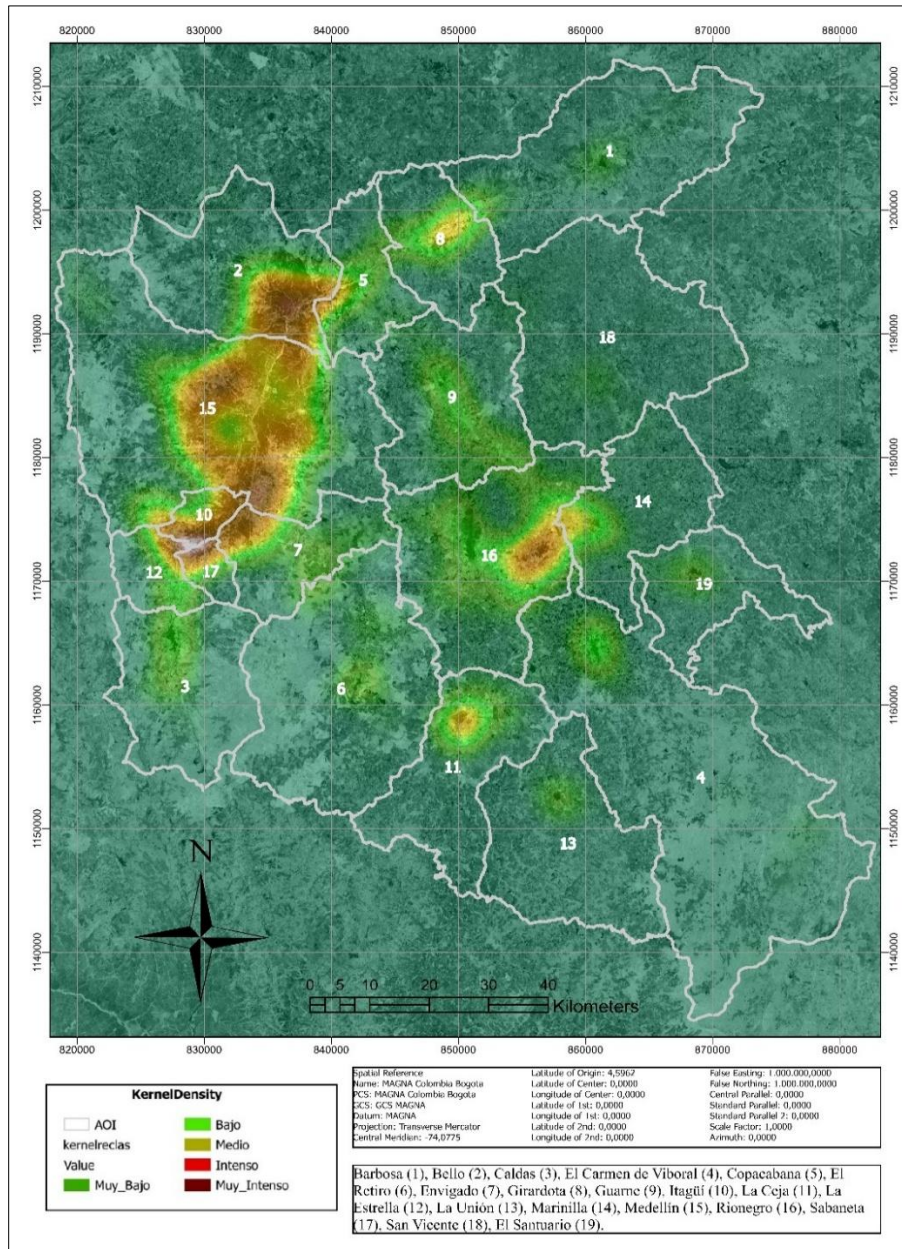


Imagen 14. Modelo de densidad de Kernel aplicada al modelo de intensidad de cambio AOI_ Total_ periodo 1986 - 2025_ ArcGISPro y entornos Python.

4.5. Evaluación metodológica comparativa (eficiencia, replicabilidad y desempeño)

4.5.1 Criterios de evaluación

Se evaluó el model LUMACHain con tres dimensiones:

- (a) Eficiencia operativa (tiempos de cómputo y número de pasos manuales),
- (b) Replicabilidad (portabilidad entre AOI, trazabilidad y control de versiones), y
- (c) Desempeño (consistencia cartográfica y estabilidad temporal de la clase “urbano”).

4.5.2 Síntesis comparativa del enfoque

- Arquitectura mixta nube–local. GEE (mosaicos SR) → Colab (índices, reglas y binarización) → ArcGIS Pro (layout y QA). Esta separación reduce cuellos de botella y permite re-ejecutar fases sin rehacer todo el flujo.
- Estandarización temporal. Ventanas multianuales equivalentes y composición por mediana minimizan ruido fenológico y hacen comparables los periodos.
- Clasificación binaria + reglas umbralizadas. Combina señales robustas (NDVI, MNDWI/NDWI, NDBI, IBI) y pendiente; la capa “Intensidad de Cambio” exige estabilidad al final (no cuenta cambios transitorios), lo que mejora la precisión de cambio efectivo frente a comparaciones simples a dos fechas.
- Zonales automáticas. La salida municipal (urb_km², Δ, tasas) se produce a partir de una misma plantilla, garantizando portabilidad entre AMVA y AOA y futura extensión a otras subregiones.

4.5.3 Eficiencia operativa

- Paralelización natural. La fase de mosaicos corre en GEE (escalable por periodo/colección); cálculo de índices y reglas corre por lotes en Colab.
- Pocos puntos manuales críticos. Solo: (a) definición/actualización de AOI, (b) revisión de umbrales globales, (c) QA visual final.
- Plantillas re-usables. Scripts y nombres de salida estandarizados (por periodo/AOI) reducen errores y facilitan auditoría.
- Conclusión: el flujo alcanza buena eficiencia para series largas (1984–2025) porque evita reprocesar escenas y concentra la iteración en umbrales/QA, no en pre-procesamiento.

4.5.4 Replicabilidad

- Determinismo en insumos. Uso de Landsat SR, máscara de nubes/sombras y EPSG único (MAGNA-SIRGAS / UTM 18N) favorecen resultados repetibles.

- Parámetros explícitos. Umbrales, orden de fusión (CLS) y filtros morfológicos documentados; cualquier ajuste se puede versionar por periodo.
- Portabilidad entre AOI. La misma receta corrió en AMVA (valle densificado) y AOA (altiplano policéntrico) sin rediseñar la cadena.
- Como pruebas adicionales el modelo se corrió sobre la RMBC región metropolitana de Bogotá y Cundinamarca y también sobre AMCO Área Metropolitana de centro y occidente. Obtenidos resultados aceptables para la caracterización automatizada realizando ajustes mínimos al proceso de umbrales adaptativos para las muestras de entrenamiento.
- Conclusión: alta replicabilidad, siempre que se mantenga la misma versión de colecciones SR y la misma máscara SRTM/pending.

4.5.5 Desempeño cartográfico

- Consistencia temporal. La condición de “urbano estable al final” reduce falsos positivos de corto plazo; la señal espacial coincide con corredores viales, planicies y núcleos esperados.
- Robustez espectral. La combinación NDBI (+), NDVI (inv), MNDWI (inv) y pendiente penalizada produce un UrbScore estable en ambos contextos.
- Validación operativa. La lectura municipal (Δ , tasas, KDE) es coherente con la morfología observada: densificación/coalescencia en AMVA; expansión policéntrica/corredores en AOA.
- Conclusión: buen desempeño para mapear urbano/no urbano y cambio consolidado; adecuado para análisis comparativos y soporte a POT/PBOT. Es necesario realizar pruebas y adaptaciones para caracterizar otras coberturas.

4.5.6 Riesgos de sesgo y mitigaciones

- Dependencia de umbrales globales. Riesgo de sub/over-detección local → Mitigar con macroajustes por ecozona o validación estratificada (muestras por valle/ladera/altiplano).
- Sombra topográfica / estaciones. Afecta NDVI/IBI → Mitigar con normalización estacional y verificación visual en laderas (uso de pendiente como penalización ya ayuda).
- Cambios transitorios (suelo desnudo/agro). Filtrados por la condición de estabilidad al final; mantener esta regla es clave.

Conclusión general. Para el objetivo del estudio —comparar histórica y espacialmente la expansión urbana en AMVA + AOA, LUMACHain ofrece una relación óptima entre eficiencia, replicabilidad y desempeño: procesa cuatro décadas de datos con coherencia temporal, entrega salidas comparables entre subregiones y produce indicadores municipales accionables (Δ , tasas, densificación/corredores). Sus limitaciones son conocidas y mitigables con ajustes modestos (validación estratificada, umbrales por ecozona y, si se requiere, fusión SAR).

4.6 Potencial de urbanización

El mapa presenta el escenario tendencial depurado de adecuabilidad urbana: se excluyeron estrictamente riberas y cuerpos de agua mediante una máscara hídrica y las laderas con pendientes altas asociadas a riesgo y amenaza; además, se sustrajo todo el suelo ya construido al 2025 para mostrar únicamente la disponibilidad efectiva. La ponderación combina distancias euclidianas a la red vial y a centralidades identificadas por densidad de kernel, de modo que las zonas verde-azul corresponden a la muy alta adecuabilidad. En el AMVA, las áreas altamente adecuadas aparecen como corredores lineales paralelos a las autopistas del valle, con escasa amplitud lateral, lo que limita la densificación horizontal; en los frentes más saturados y/o con mayor pendiente, las islas de alta aptitud son pequeñas y fragmentadas, de modo que a 2025 el alto potencial se observa prácticamente agotado y persiste sobre todo en franjas estrechas ligadas a ejes viales. En el Altiplano del Oriente, por el contrario, se reconocen amplias zonas disponibles con alta o muy alta adecuabilidad en Rionegro, La Ceja y La Unión, favorecidas por pendientes moderadas y proximidad a vías que potencian la logística y actividades industriales; en menor medida, se abren oportunidades en El Carmen de Viboral y a lo largo de la cuenca baja del valle de San Nicolás, articulada a la Autopista Medellín–Bogotá. Las clases altas forman una cobertura difusa perimetral alrededor del altiplano que, sin habilitar megaproyectos por sí sola, facilita conurbaciones rurales próximas a áreas urbanas y funciona como franja de contención frente a bordes forestales y agropecuarios consolidados. Para evidenciar la tendencia pura, las figuras de protección no se aplicaron como restricción estricta; por ello pueden observarse micro-islas contiguas a

ANÁLISIS MULTITEMPORAL COMPARATIVO DE LA EXPANSIÓN URBANA (1984-2025) EN EL VALLE DE ABURRÁ Y EL ALTIPLANO DEL ORIENTE

dichas áreas, cuya viabilidad real dependerá de la norma, la gestión del riesgo y la capacidad de infraestructura.

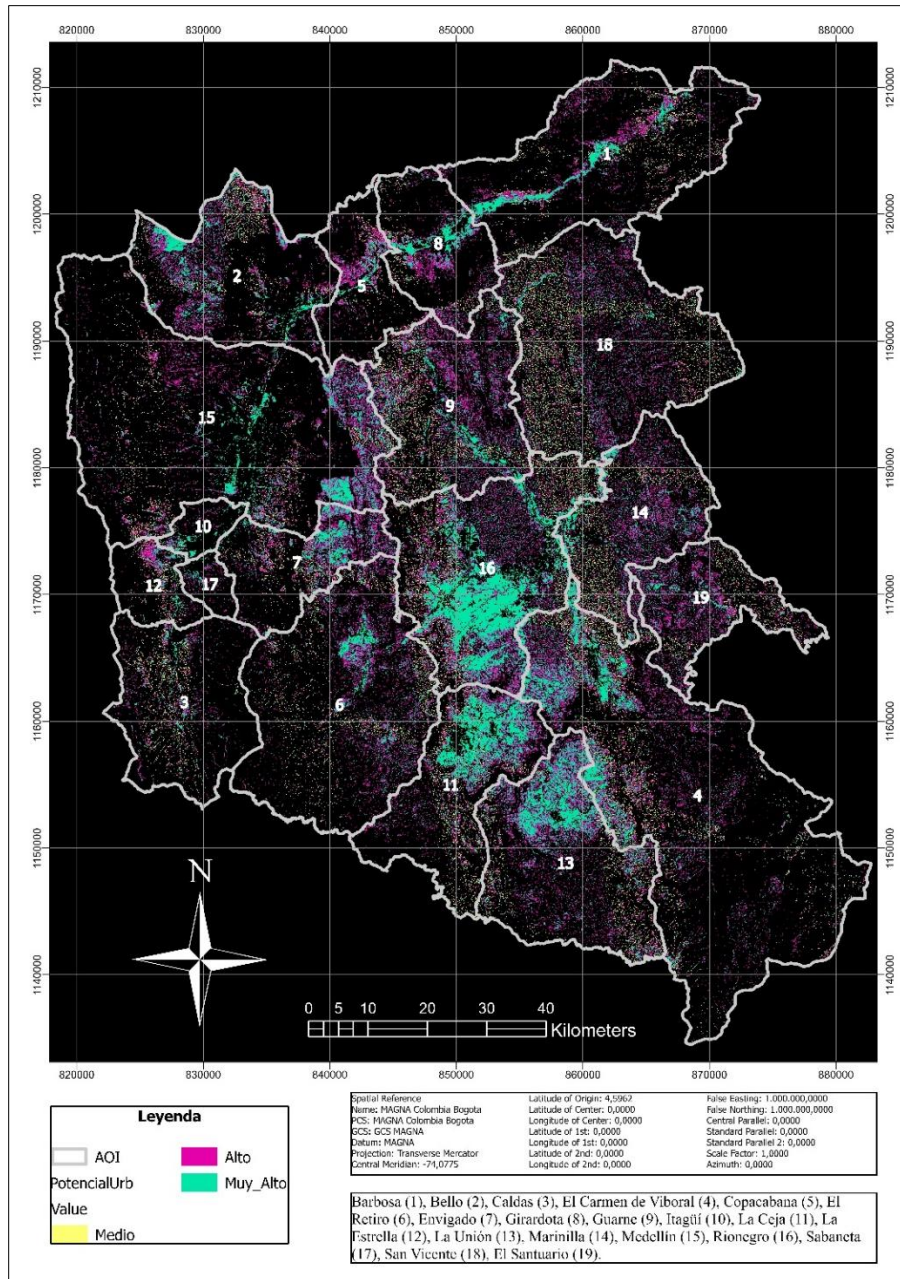
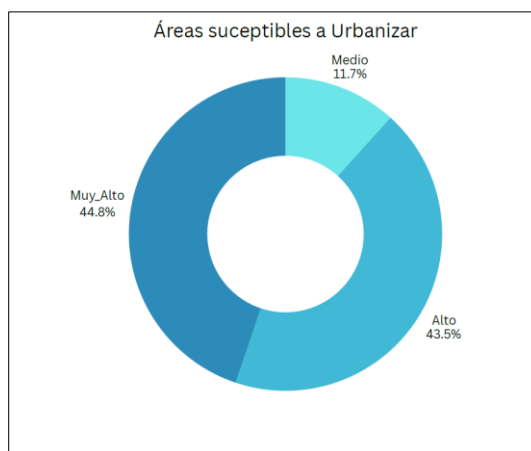


Imagen 15. Modelo de adecuabilidad énfasis en áreas susceptibles a densificación urbana AOI_Total periodo 1986 - 2025_ ArcGISPro y entornos Python.

**ANÁLISIS MULTITEMPORAL COMPARATIVO DE LA EXPANSIÓN URBANA
(1984-2025) EN EL VALLE DE ABURRÁ Y EL ALTIPLANO DEL ORIENTE**

Tabla 10. Resultados Modelo de Adecuabilidad de zonas susceptibles a urbanizar_ AOI_ Total_ Elaboración propia ArcGISPro; Excel; Entornos Python.

Categoría	Gridcode	Area_Km2	Condición
Medio	3	69	Fragmentado Lejano
Alto	4	256	Fragmentado
Muy_Alto	5	264	Continuo



Gráfica 9. Distribución de las áreas susceptibles a densificación urbana_ AOI_ Total_ Elaboración propia ArcGISPro; Excel; Entornos Python.

Aquí, la tabla y el gráfico de dona sintetizan la disponibilidad de suelo potencial según la adecuabilidad: “Muy alto” (gridcode 5) suma ~264 km² y se caracteriza por continuidad espacial; “Alto” (gridcode 4) aporta ~256 km² con patrón fragmentado; y “Medio” (gridcode 3) representa ~69 km², mayormente fragmentado y más lejano. El gráfico confirma esa estructura: Muy alto ≈ 45%, Alto ≈ 44% y Medio ≈ 11–12% del total de áreas susceptibles a urbanizar. En términos de gestión, la mayor parte del potencial se concentra en clases altas y continuas, útiles para consolidación y cierre de vacíos, mientras que el componente “Medio” debería evaluarse con mayor selectividad por su dispersión y costos de extensión de redes.

4.7 Mapa de conflicto Urbano Pendiente

Esta capa se obtuvo cruzando (intersección lógica) un mapa de pendientes reclasificado por riesgo/amenaza (clases altas de inestabilidad) con la detección de urbano del último periodo evaluado (2023–2025); el resultado marca como (1) las áreas ya construidas que se ubican sobre pendientes críticas, es decir, en conflicto por pendiente. En el AMVA se observan extensiones amplias y continuas de conflicto asociadas a ocupación de laderas y franjas periurbanas densificadas y conurbadas, donde la urbanización reciente se ha superpuesto a terrenos con fuertes gradientes, concentrando presión sobre taludes y aumentando la exposición a procesos de remoción en masa. En contraste, en el AOA la ocurrencia es menor y más dispersa, coherente con una oferta relativamente favorable de superficies con aptitud topográfica para uso urbano; allí el conflicto aparece principalmente en bordes de expansión y en tramos viales localizados. En conjunto, la capa sirve para priorizar control urbano y medidas de estabilización en laderas ocupadas, y para orientar el crecimiento hacia unidades con pendientes moderadas y condiciones geotécnicas más estables.

ANÁLISIS MULTITEMPORAL COMPARATIVO DE LA EXPANSIÓN URBANA (1984-2025) EN EL VALLE DE ABURRÁ Y EL ALTIPLANO DEL ORIENTE

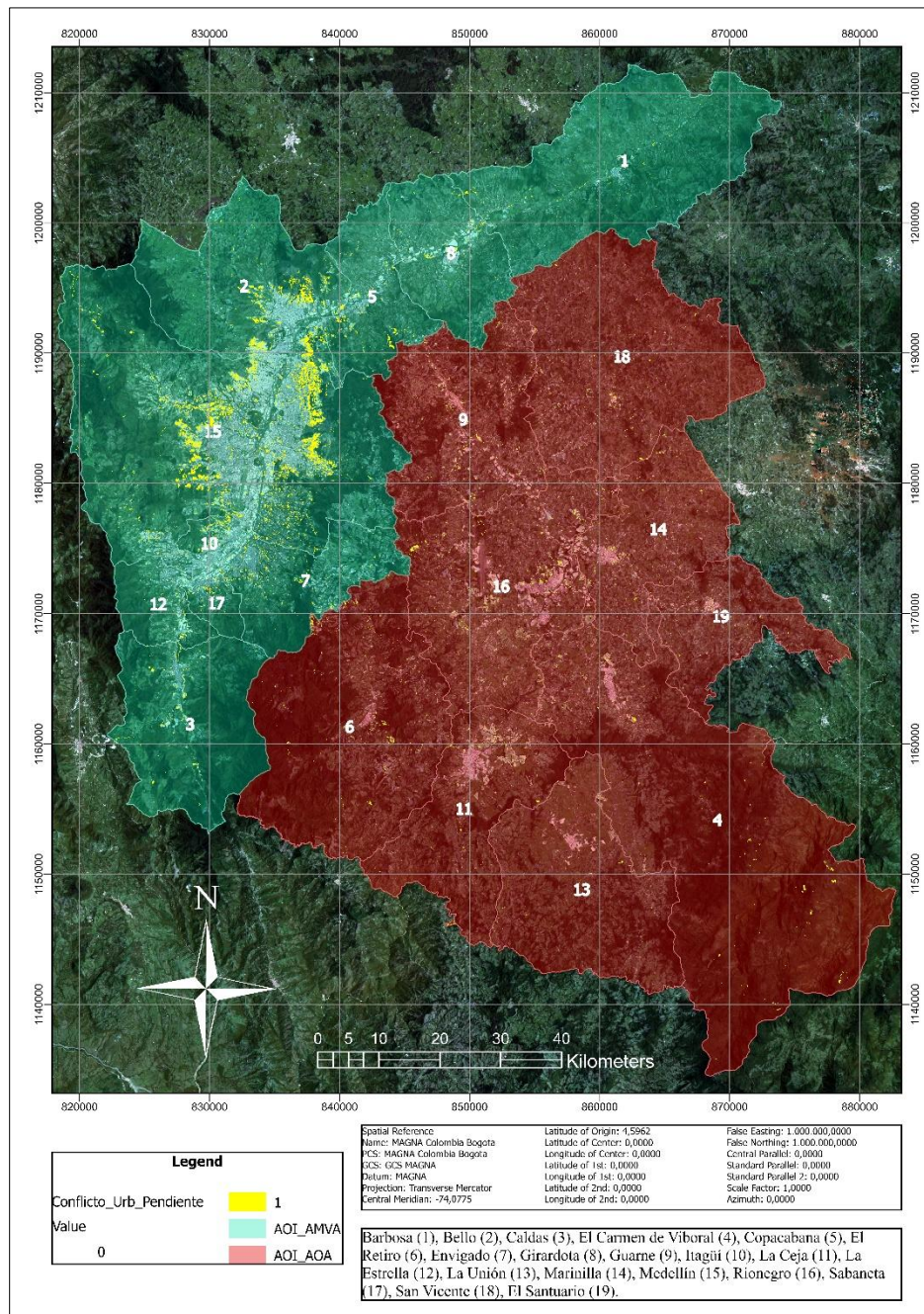


Imagen 16. Modelo de conflicto pendiente - urbano_ AOA_ Total año 2025_ ArcGISPro y entornos Python.

4.8 Validación y calidad del clasificador

Para cada periodo del stack (1984–2025) se validó el binario urbano/no-urbano contra capas de referencia armonizadas (GHSL 1990/2000/2015/2020, WSF2015 y WorldCover2021). Todas las referencias se recortaron al AOI, se reproyectaron a MAGNA-SIRGAS y se remuestrearon a la misma resolución del modelo. La comparación fue píxel-a-píxel (matriz de confusión) y se calcularon OA, F1, IoU y kappa; adicionalmente, error de comisión (falsos positivos urbanos) y omisión (falsos negativos urbanos). En periodos sin referencia exacta del mismo año, se emparejó con la capa más cercana en el tiempo y se mantuvo el mismo umbral binario para todo el stack.

Tabla 11. Validación y calidad del modelo clasificador aplicado por periodo_ Elaboración propia ArcGISPro; Excel; Entornos Python.

periodo	OA	F1	IoU	kappa
1984-1986	0,7319	0,1605	0,0872	0,115
1987-1995	0,7362	0,1887	0,1042	0,1361
1996-1998	0,7277	0,2149	0,1204	0,1538
1999-2001	0,7298	0,2274	0,1283	0,1631
2002-2004	0,7311	0,2357	0,1336	0,1694
2005-2007	0,7337	0,2512	0,1437	0,1811
2008-2010	0,8393	0,4551	0,3152	0,4055
2011-2013	0,8406	0,466	0,3252	0,4154
2014-2016	0,842	0,4773	0,3356	0,4257
2017-2019	0,8821	0,5658	0,4191	0,5243
2020-2022	0,8821	0,5681	0,4209	0,5258
2023-2025	0,8461	0,5136	0,3732	0,4606

Tabla 12. Validación y calidad del modelo clasificador aplicado por fuente_ Elaboración propia ArcGISPro; Excel; Entornos Python.

Tipo_ref	OA	F1	IoU	kappa	err_comision	err_omision
GHSL	0,7296	0,2481	0,1423	0,1778	0,0999	0,8553
WSF2015	0,9532	0,6676	0,5011	0,6432	0,1998	0,4264
WorldCover2021	0,9658	0,7295	0,5742	0,7113	0,2803	0,26

Los resultados por periodo muestran desempeño estable y en mejora desde los noventa hasta 2025 (OA ~0,73–0,88; kappa ~0,12–0,46), con picos de calidad en ventanas recientes donde

la señal urbana es más consistente y las referencias son más modernas. Por fuente, WorldCover2021 ofrece el mejor equilibrio ($OA \approx 0,966$; $F1 \approx 0,729$; $IoU \approx 0,574$; $\kappa \approx 0,711$; $comisión \approx 0,280$; $omisión \approx 0,260$), WSF2015 tiene OA alto pero mayor omisión ($OA \approx 0,953$; $F1 \approx 0,667$; $IoU \approx 0,501$; $\kappa \approx 0,643$; $comisión \approx 0,200$; $omisión \approx 0,426$), y GHSL es claramente inferior para validación fina ($OA \approx 0,730$; $F1 \approx 0,248$; $IoU \approx 0,142$; $\kappa \approx 0,178$; $omisión \approx 0,856$). En síntesis: el modelo reproduce bien la huella urbana, especialmente en periodos recientes; y las referencias contemporáneas (WorldCover/WSF) son las adecuadas para reportar métricas, mientras que GHSL funciona solo como control histórico grueso.

5. Discusión de Resultados e Implicaciones

Este capítulo discute la relevancia de los hallazgos espaciales y temporales generados por el Modelo LUMACHain y los patrones comparativos de expansión en el Valle de Aburrá (AMVA) y el Altiplano del Oriente Antioqueño (AOA). Se contrastan los resultados con la literatura especializada, se analizan los factores impulsores (drivers) que explican las dinámicas observadas, y se abordan los alcances y limitaciones de la metodología empleada.

5.1. Contraste de las Dinámicas de Expansión Urbana (1984–2025)

La principal contribución del análisis multitemporal es la diferenciación clara en la trayectoria de crecimiento entre el AMVA y el AOA:

Madurez y Densificación del AMVA: El Valle de Aburrá, como área urbana consolidada, evidencia una transición hacia la densificación y la coalescencia (fusión de centros urbanos). Las tasas de crecimiento en intensidad de cambio (Tasa de Intensidad) para el AMVA tienden a la estabilización o disminución en los periodos más recientes. Esto confirma los postulados de los modelos de crecimiento urbano en fase de saturación, donde las restricciones geográficas (topografía escarpada) y normativas (escasez de suelo apto y regulado) fuerzan el crecimiento vertical sobre la expansión horizontal. Este patrón se alinea con estudios sobre

grandes metrópolis latinoamericanas que han agotado su capacidad de crecimiento en el borde de cuenca.

Expansión Dispersa y Policéntrica del AOA: En contraste, el Altiplano del Oriente Antioqueño exhibe una dinámica de expansión acelerada y dispersa, caracterizada por la emergencia de múltiples centros de crecimiento (policentrismo incipiente) a lo largo de los principales corredores viales, especialmente la Autopista Medellín-Bogotá. Este patrón de salto de rana (leapfrogging) consume suelo de manera ineficiente y no obedece necesariamente a la lógica de proximidad al núcleo de Rionegro. El AOA se encuentra en una fase temprana de transición metropolitana, similar a las áreas periurbanas en el Sur Global, donde la accesibilidad a infraestructura prima sobre la consolidación interna.

5.2. Factores Impulsores (Drivers) de los Patrones Espaciales

La explicación de estas trayectorias divergentes se encuentra en la interacción de los tres grupos de drivers utilizados en el modelo de Adecuabilidad: Factores Físicos, Factores de Conectividad y Factores Normativos/Regulatorios.

5.2.1. Factores Físicos y Topográficos

La variable Pendiente demuestra ser un factor limitante determinante en el AMVA. Históricamente, el crecimiento urbano se ha desplazado hacia las áreas de menor pendiente. Al saturarse el fondo del valle, la expansión se limita a la redensificación. Por otro lado, la vasta disponibilidad de suelos planos y semiplanos en el AOA permite que los Factores de Conectividad (accesibilidad vial) se conviertan en los drivers dominantes de la dispersión, relegando la restricción física a un segundo plano.

5.2.2. Factores de Conectividad e Infraestructura

El rol de la Distancia a Vías Principales es crucial para entender el AOA. La tesis confirma que la expansión reciente del altiplano está fuertemente correlacionada con la accesibilidad a la infraestructura vial, impulsada por proyectos de vivienda de segunda residencia y el boom de servicios periurbanos. Esta dependencia de la infraestructura, sin la adecuada

planeación del uso del suelo colindante, es la causa directa del patrón disperso y fragmentado que se observa en los mapas de Intensidad de Cambio en municipios como Rionegro y La Ceja.

5.2.3. Implicaciones Regulatorias (POT/PBOT)

La divergencia más significativa reside en la relación entre el crecimiento modelado y los instrumentos de planificación. El Mapa de Conflicto Urbano Pendiente es la evidencia empírica de una desconexión entre la realidad observada y la planificación normativa. Los municipios del AOA, en particular, muestran zonas de alta intensidad de cambio que coinciden con suelos con aptitud ambiental o agropecuaria, señalando una fragilidad en la implementación o una obsolescencia en la formulación de los Planes de Ordenamiento Territorial (POT/PBOT) frente a las presiones del mercado y la infraestructura. Esto subraya la urgencia de integrar análisis de Geoinformática en la revisión de los instrumentos de gestión del suelo.

5.3. Alcances, Aportes y Limitaciones del Model LUMACHain

5.3.1. Aportes Metodológicos

El Modelo LUMACHain representa un aporte metodológico sólido en la Geoinformática territorial por varias razones:

Reconstrucción Histórica Rigurosa: Permite la generación de una serie histórica de 40 años (1984–2025) con un alto nivel de precisión (OA de hasta 0,966) a partir de datos Landsat en GEE.

Transparencia y Replicabilidad: La integración de plataformas open-source (GEE/Colab) con herramientas SIG (ArcGIS Pro) dota a la cadena de un alto grado de replicabilidad por parte de las entidades de planificación territorial.

Evaluación Consistente: La validación exhaustiva con fuentes externas de referencia global (GHSL, WSF) otorga confianza en la consistencia de la huella urbana generada a lo largo del tiempo, superando la limitación de la escasez de cartografía histórica homogénea.

5.3.2. Limitaciones del Estudio

Es fundamental reconocer las limitaciones inherentes al enfoque para establecer un marco de investigación futura:

Resolución Espacial: El uso de imágenes Landsat (30 metros) limita la capacidad de detección de la expansión urbana en áreas de muy baja densidad o de viviendas unifamiliares muy dispersas, lo cual puede subestimar ligeramente la huella real en el AOA.

Modelo de Factores Exclusivamente Físicos: Aunque la precisión es alta, el modelo de Adecuabilidad se basó en factores físicos, de conectividad y de pendiente. No se incorporaron explícitamente variables socioeconómicas complejas (p. ej., precios del suelo, movimientos demográficos específicos, política de vivienda), lo cual podría refinar la predicción de la demanda de suelo y no solo la aptitud del mismo.

Escenario de Tendencia (2025): La proyección para 2025 es un escenario de tendencia inercial. Este escenario no incorpora un cambio de política pública o un shock económico, por lo cual debe ser interpretado como la continuación del patrón de crecimiento actual si no se toman medidas correctivas.

5.4. Conclusiones para la Gestión Territorial

Los resultados de este estudio ofrecen una alerta temprana para las autoridades ambientales (CORNARE) y los gobiernos locales. La discrepancia en los patrones de crecimiento demanda enfoques de gestión diferenciados:

AMVA: El enfoque debe pasar de la gestión de la expansión a la gestión de la densidad y la calidad de vida en entornos compactos.

AOA: La prioridad debe ser la contención de la dispersión, utilizando los mapas de Adecuabilidad y de Conflicto para blindar los suelos de alto valor agroecológico e hídrico de la presión inmobiliaria, y promover un desarrollo más compacto y sostenible en los núcleos urbanos existentes, revirtiendo la inercia del patrón policéntrico y disperso.

6. Conclusiones

- ✓ Entre 1984 y 2025 la mancha urbana creció de forma sostenida en ambas áreas. En el AMVA pasó de cerca de 70 km² a ~149 km² y en el AOA de ~12 km² a ~45 km², con aceleración notoria entre 2008 y 2019. En el AMVA el crecimiento se consolidó en el eje del río Aburrá y sus corredores industriales; en el AOA el patrón fue más policéntrico, articulado por los valles intermedios.
- ✓ Los mayores aportes absolutos provinieron de Medellín y del corredor sur metropolitano (Itagüí, Envigado, La Estrella), con extensiones hacia planicies y ejes viales. En el AOA, Rionegro concentró el incremento más alto, seguido por La Ceja, Marinilla, Guarne y El Retiro, mientras municipios como San Vicente y Sonsón aportaron poco.
- ✓ La validación indica un desempeño consistente del modelo. Los periodos recientes superan OA ~0.84 y alcanzan kappa en el orden de 0.4–0.5. Frente a mapas de referencia, el acuerdo fue mejor con WSF2015 y WorldCover2021 que con GHSL, lo que respalda el uso del producto para análisis regional y seguimiento multitemporal.
- ✓ El cruce con pendientes y amenaza evidencia focos de ocupación en laderas inestables y la necesidad de condicionar el crecimiento a suelos con menor susceptibilidad. La aptitud para expansión se concentra en franjas continuas a la

huella urbana actual y la mayor parte del potencial se ubica en clases Alta y Muy Alta, lo que permite orientar suelo de expansión con menor costo territorial.

- ✓ LUMACHain demostró ser una cadena reproducible y útil para los POT: permite priorizar áreas, justificar decisiones y monitorear el cambio con ciclos cortos. Sus límites principales están en la dependencia de series satelitales y de capas de referencia con incertidumbre; integrar insumos locales (catastro, redes, restricción ambiental y dinámica de precios del suelo) mejorará la precisión y reducirá sesgos en futuras aplicaciones.

7. Referencias bibliográficas

- [1] Agencia Nacional de Licencias Ambientales. (2018). Guía para la elaboración de estudios de impacto ambiental. <https://www.anla.gov.co>
- [2] Área Metropolitana del Valle de Aburrá. (2021). Determinantes y lineamientos ambientales para el ordenamiento metropolitano. <https://www.metropol.gov.co>
- [3] Banco Mundial. (2021). Urban population (share and projections). <https://data.worldbank.org>
- [4] Brenner, N. (2013). Implosions/Explosions: Towards a study of planetary urbanization. Jovis.
- [5] Campbell, J. B., & Wynne, R. H. (2011). Introduction to remote sensing (5th ed.). Guilford Press.
- [6] Congreso de la República de Colombia. (1993). Ley 99 de 1993. Por la cual se crea el SINA. Diario Oficial de Colombia.
- [7] Congreso de la República de Colombia. (1997). Ley 388 de 1997. Ordenamiento territorial municipal. Diario Oficial de Colombia.
- [8] CORNARE. (2019). Acuerdo 265 de 2019. Determinantes ambientales para POT/PBOT. <https://www.cornare.gov.co>
- [9] CORNARE. (2021). POMCA Río Negro–Nare. <https://www.cornare.gov.co>

- [10] Departamento Administrativo Nacional de Estadística. (2019). Censo Nacional de Población y Vivienda 2018: Resultados. <https://www.dane.gov.co>
- [11] Departamento Nacional de Planeación. (2022). Política de ciudades y ordenamiento territorial: Diagnóstico y lineamientos. <https://www.dnp.gov.co>
- [12] European Space Agency. (2023). Sentinel-2 MSI—User guide. <https://sentinel.esa.int>
- [13] Esri. (2024). ArcGIS Pro (version 3.x) [Computer software]. Environmental Systems Research Institute. <https://pro.arcgis.com>
- [14] Gao, F., Mountrakis, G., & Zhu, Z. (2023). A review of urban expansion monitoring using Landsat time series. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 196, 44–63. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2022.12.004>
- [15] He, C., Shi, P., Xie, D., & Zhao, Y. (2010). Improving urban mapping with an index-based built-up index (IBI). *Landscape and Urban Planning*.
- [16] Huete, A. R. (1988). A soil-adjusted vegetation index (SAVI). *Remote Sensing of Environment*.
- [17] IDEAM. (2022). Atlas climatológico de Colombia (edición actualizada). Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. <https://www.ideam.gov.co>
- [18] Jensen, J. R. (2016). *Introductory digital image processing: A remote sensing perspective* (4th ed.). Pearson.
- [19] Jenks, G. (1967). The data model concept in statistical mapping.
- [20] Kennedy, R. E., Yang, Z., & Cohen, W. B. (2010). Detecting trends in forest disturbance and recovery using yearly Landsat time series: 1. LandTrendr—Temporal segmentation algorithms. *Remote Sensing of Environment*, 114(12), 2897–2910. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2010.07.008>
- [21] Lefebvre, H. (1970). *La revolución urbana*. Alianza Editorial.
- [22] Ley 1523 de 2012. Por la cual se adopta la Política Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres. Diario Oficial de Colombia.
- [23] Ley 1931 de 2018. Por la cual se establecen directrices para la gestión del cambio climático. Diario Oficial de Colombia.

- [24] Marconcini, M., et al. (2020). World Settlement Footprint 2015. *IEEE JSTARS*.
- [25] OpenStreetMap Contributors. (2024). OpenStreetMap base data. <https://www.openstreetmap.org>
- [26] Otsu, N. (1979). A threshold selection method. *IEEE Trans. SMC*.
- [27] Pesaresi, M., Corbane, C., Julea, A., Florczyk, A. J., Syrris, V., & Soille, P. (2016). Assessment of the added-value of Sentinel-2 for detecting built-up areas. *Remote Sensing*, 8(4), 299. <https://doi.org/10.3390/rs8040299>
- [28] Pontius, R. G., & Millones, M. (2011). Agreement vs. quantity/allocation disagreement. *IJGIS*.
- [29] QGIS Development Team. (2024). QGIS Geographic Information System (version 3.x) [Computer software]. <https://qgis.org>
- [30] Rouse, J. W., Haas, R. H., Schell, J. A., & Deering, D. W. (1974). Monitoring vegetation systems with ERTS. *NASA SP-351*.
- [31] Roy, D. P., Wulder, M. A., Loveland, T. R., C.E. Woodcock, Allen, R. G., Anderson, M. C., Helder, D., Irons, J. R., Johnson, D. M., Kennedy, R., Scambos, T., Schaaf, C., Schott, J. R., Sheng, Y., Vermote, E., Belward, A. S., Bindschadler, R., Cohen, W. B., Gao, F., ... Zhu, Z. (2014). Landsat-8: Science and product vision for terrestrial global change research. *Remote Sensing of Environment*, 145, 154–172. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.02.001>
- [32] Seto, K. C., Fragkias, M., Güneralp, B., & Reilly, M. K. (2011). A meta-analysis of global urban land expansion. *PLoS ONE*, 6(8), e23777. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0023777>
- [33] U.S. Geological Survey. (2023). Landsat 8–9 Collection 2 Level-2 Science Products. <https://www.usgs.gov/landsat>
- [34] U.S. Geological Survey. (2020). Copernicus & SRTM digital elevation models. <https://earthexplorer.usgs.gov>
- [35] Wilson, J. P., & Gallant, J. C. (Eds.). (2000). *Terrain analysis: Principles and applications*. Wiley.

- [36] Wulder, M. A., White, J. C., Loveland, T. R., Woodcock, C. E., Belward, A. S., Cohen, W. B., Fosnight, E. A., Shaw, J., Masek, J. G., & Roy, D. P. (2016). The global Landsat archive: Status, consolidation, and direction. *Remote Sensing of Environment*, 185, 271–283. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2015.11.032>
- [37] Xu, H. (2006). Modification of normalised difference water index (MNDWI). *International Journal of Remote Sensing*.
- [38] Zhang, C., & Zhu, Z. (2023). Urban expansion monitoring with Landsat data: Methods, challenges and opportunities. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 196, 44–63. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2022.12.004>
- [39] Zhu, Z., & Woodcock, C. E. (2014). Continuous change detection and classification of land cover using all available Landsat data. *Remote Sensing of Environment*, 144, 152–171. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.01.011>

8. Anexos

8.1 Tablas y estadísticas completas

Tabla 13. Resultados Fase 5_ Estadísticas zonales AMVA_ Elaboración propia ArcGISPro; Excel; Entornos Python.

AOI	Periodo	Municipio name	UrbInicial km2	UrbFinal km2	Deltakm2	Delta Anual
AOI_AMVA	1984_1986	Medellín		48,1095	0	0
AOI_AMVA	1987_1995	Medellín	48,1095	56,2977	8,1882	1,023525
AOI_AMVA	1996_1998	Medellín	56,2977	64,8207	8,523	4,2615
AOI_AMVA	1999_2001	Medellín	64,8207	68,4333	3,6126	1,8063
AOI_AMVA	2002_2004	Medellín	68,4333	70,9002	2,4669	1,23345
AOI_AMVA	2005_2007	Medellín	70,9002	74,9502	4,05	2,025
AOI_AMVA	2008_2010	Medellín	74,9502	77,7366	2,7864	1,3932
AOI_AMVA	2011_2013	Medellín	77,7366	79,2477	1,5111	0,75555
AOI_AMVA	2014_2016	Medellín	79,2477	81,1719	1,9242	0,9621
AOI_AMVA	2017_2019	Medellín	81,1719	82,5939	1,422	0,711
AOI_AMVA	2020_2022	Medellín	82,5939	83,6172	1,0233	0,51165
AOI_AMVA	2023_2025	Medellín	83,6172	85,0185	1,4013	0,70065

**ANÁLISIS MULTITEMPORAL COMPARATIVO DE LA EXPANSIÓN URBANA
(1984-2025) EN EL VALLE DE ABURRÁ Y EL ALTIPLANO DEL ORIENTE**

76

AOI_AMVA	1984_1986	Barbosa		0,7587	0	0
AOI_AMVA	1987_1995	Barbosa	0,7587	0,9144	0,1557	0,019463
AOI_AMVA	1996_1998	Barbosa	0,9144	1,188	0,2736	0,1368
AOI_AMVA	1999_2001	Barbosa	1,188	1,2465	0,0585	0,02925
AOI_AMVA	2002_2004	Barbosa	1,2465	1,2789	0,0324	0,0162
AOI_AMVA	2005_2007	Barbosa	1,2789	1,386	0,1071	0,05355
AOI_AMVA	2008_2010	Barbosa	1,386	1,5192	0,1332	0,0666
AOI_AMVA	2011_2013	Barbosa	1,5192	1,6407	0,1215	0,06075
AOI_AMVA	2014_2016	Barbosa	1,6407	1,8657	0,225	0,1125
AOI_AMVA	2017_2019	Barbosa	1,8657	1,9665	0,1008	0,0504
AOI_AMVA	2020_2022	Barbosa	1,9665	2,1087	0,1422	0,0711
AOI_AMVA	2023_2025	Barbosa	2,1087	2,2257	0,117	0,0585
AOI_AMVA	1984_1986	Bello		8,8398	0	0
AOI_AMVA	1987_1995	Bello	8,8398	11,9079	3,0681	0,383513
AOI_AMVA	1996_1998	Bello	11,9079	13,7952	1,8873	0,94365
AOI_AMVA	1999_2001	Bello	13,7952	14,7879	0,9927	0,49635
AOI_AMVA	2002_2004	Bello	14,7879	15,5853	0,7974	0,3987
AOI_AMVA	2005_2007	Bello	15,5853	16,4655	0,8802	0,4401
AOI_AMVA	2008_2010	Bello	16,4655	17,3403	0,8748	0,4374
AOI_AMVA	2011_2013	Bello	17,3403	17,9181	0,5778	0,2889
AOI_AMVA	2014_2016	Bello	17,9181	18,9423	1,0242	0,5121
AOI_AMVA	2017_2019	Bello	18,9423	19,7784	0,8361	0,41805
AOI_AMVA	2020_2022	Bello	19,7784	20,4048	0,6264	0,3132
AOI_AMVA	2023_2025	Bello	20,4048	20,9898	0,585	0,2925
AOI_AMVA	1984_1986	Caldas		0,9099	0	0
AOI_AMVA	1987_1995	Caldas	0,9099	1,1817	0,2718	0,033975
AOI_AMVA	1996_1998	Caldas	1,1817	1,5426	0,3609	0,18045
AOI_AMVA	1999_2001	Caldas	1,5426	1,6911	0,1485	0,07425
AOI_AMVA	2002_2004	Caldas	1,6911	1,7505	0,0594	0,0297
AOI_AMVA	2005_2007	Caldas	1,7505	1,9017	0,1512	0,0756
AOI_AMVA	2008_2010	Caldas	1,9017	2,1825	0,2808	0,1404
AOI_AMVA	2011_2013	Caldas	2,1825	2,3841	0,2016	0,1008
AOI_AMVA	2014_2016	Caldas	2,3841	2,6964	0,3123	0,15615
AOI_AMVA	2017_2019	Caldas	2,6964	2,9979	0,3015	0,15075
AOI_AMVA	2020_2022	Caldas	2,9979	3,1572	0,1593	0,07965
AOI_AMVA	2023_2025	Caldas	3,1572	3,4164	0,2592	0,1296
AOI_AMVA	1984_1986	Copacabana		1,2213	0	0
AOI_AMVA	1987_1995	Copacabana	1,2213	1,6803	0,459	0,057375
AOI_AMVA	1996_1998	Copacabana	1,6803	2,106	0,4257	0,21285
AOI_AMVA	1999_2001	Copacabana	2,106	2,4768	0,3708	0,1854
AOI_AMVA	2002_2004	Copacabana	2,4768	2,592	0,1152	0,0576
AOI_AMVA	2005_2007	Copacabana	2,592	2,8926	0,3006	0,1503

76

**ANÁLISIS MULTITEMPORAL COMPARATIVO DE LA EXPANSIÓN URBANA
(1984-2025) EN EL VALLE DE ABURRÁ Y EL ALTIPLANO DEL ORIENTE**

77

AOI_AMVA	2008_2010	Copacabana	2,8926	3,2283	0,3357	0,16785
AOI_AMVA	2011_2013	Copacabana	3,2283	3,4011	0,1728	0,0864
AOI_AMVA	2014_2016	Copacabana	3,4011	3,7215	0,3204	0,1602
AOI_AMVA	2017_2019	Copacabana	3,7215	4,0176	0,2961	0,14805
AOI_AMVA	2020_2022	Copacabana	4,0176	4,1895	0,1719	0,08595
AOI_AMVA	2023_2025	Copacabana	4,1895	4,4847	0,2952	0,1476
AOI_AMVA	1984_1986	Envigado		3,3705	0	0
AOI_AMVA	1987_1995	Envigado	3,3705	3,9069	0,5364	0,06705
AOI_AMVA	1996_1998	Envigado	3,9069	5,3748	1,4679	0,73395
AOI_AMVA	1999_2001	Envigado	5,3748	5,733	0,3582	0,1791
AOI_AMVA	2002_2004	Envigado	5,733	5,9427	0,2097	0,10485
AOI_AMVA	2005_2007	Envigado	5,9427	6,9588	1,0161	0,50805
AOI_AMVA	2008_2010	Envigado	6,9588	7,7679	0,8091	0,40455
AOI_AMVA	2011_2013	Envigado	7,7679	8,1081	0,3402	0,1701
AOI_AMVA	2014_2016	Envigado	8,1081	8,5986	0,4905	0,24525
AOI_AMVA	2017_2019	Envigado	8,5986	9,09	0,4914	0,2457
AOI_AMVA	2020_2022	Envigado	9,09	9,3708	0,2808	0,1404
AOI_AMVA	2023_2025	Envigado	9,3708	9,7533	0,3825	0,19125
AOI_AMVA	1984_1986	Girardota		0,9459	0	0
AOI_AMVA	1987_1995	Girardota	0,9459	1,3077	0,3618	0,045225
AOI_AMVA	1996_1998	Girardota	1,3077	1,9251	0,6174	0,3087
AOI_AMVA	1999_2001	Girardota	1,9251	2,1771	0,252	0,126
AOI_AMVA	2002_2004	Girardota	2,1771	2,2941	0,117	0,0585
AOI_AMVA	2005_2007	Girardota	2,2941	2,7558	0,4617	0,23085
AOI_AMVA	2008_2010	Girardota	2,7558	3,2877	0,5319	0,26595
AOI_AMVA	2011_2013	Girardota	3,2877	3,726	0,4383	0,21915
AOI_AMVA	2014_2016	Girardota	3,726	4,1139	0,3879	0,19395
AOI_AMVA	2017_2019	Girardota	4,1139	4,563	0,4491	0,22455
AOI_AMVA	2020_2022	Girardota	4,563	4,833	0,27	0,135
AOI_AMVA	2023_2025	Girardota	4,833	5,139	0,306	0,153
AOI_AMVA	1984_1986	Itagüí		6,3747	0	0
AOI_AMVA	1987_1995	Itagüí	6,3747	7,5528	1,1781	0,147263
AOI_AMVA	1996_1998	Itagüí	7,5528	8,7966	1,2438	0,6219
AOI_AMVA	1999_2001	Itagüí	8,7966	9,1224	0,3258	0,1629
AOI_AMVA	2002_2004	Itagüí	9,1224	9,2952	0,1728	0,0864
AOI_AMVA	2005_2007	Itagüí	9,2952	9,7074	0,4122	0,2061
AOI_AMVA	2008_2010	Itagüí	9,7074	9,9567	0,2493	0,12465
AOI_AMVA	2011_2013	Itagüí	9,9567	10,0935	0,1368	0,0684
AOI_AMVA	2014_2016	Itagüí	10,0935	10,2348	0,1413	0,07065
AOI_AMVA	2017_2019	Itagüí	10,2348	10,485	0,2502	0,1251
AOI_AMVA	2020_2022	Itagüí	10,485	10,566	0,081	0,0405
AOI_AMVA	2023_2025	Itagüí	10,566	10,7406	0,1746	0,0873

77

**ANÁLISIS MULTITEMPORAL COMPARATIVO DE LA EXPANSIÓN URBANA
(1984-2025) EN EL VALLE DE ABURRÁ Y EL ALTIPLANO DEL ORIENTE**

78

AOI_AMVA	1984_1986	La Estrella		0,6462	0	0
AOI_AMVA	1987_1995	La Estrella	0,6462	0,8316	0,1854	0,023175
AOI_AMVA	1996_1998	La Estrella	0,8316	1,3077	0,4761	0,23805
AOI_AMVA	1999_2001	La Estrella	1,3077	1,476	0,1683	0,08415
AOI_AMVA	2002_2004	La Estrella	1,476	1,5723	0,0963	0,04815
AOI_AMVA	2005_2007	La Estrella	1,5723	1,9395	0,3672	0,1836
AOI_AMVA	2008_2010	La Estrella	1,9395	2,4228	0,4833	0,24165
AOI_AMVA	2011_2013	La Estrella	2,4228	2,6883	0,2655	0,13275
AOI_AMVA	2014_2016	La Estrella	2,6883	2,9952	0,3069	0,15345
AOI_AMVA	2017_2019	La Estrella	2,9952	3,2409	0,2457	0,12285
AOI_AMVA	2020_2022	La Estrella	3,2409	3,3768	0,1359	0,06795
AOI_AMVA	2023_2025	La Estrella	3,3768	3,5892	0,2124	0,1062
AOI_AMVA	1984_1986	Sabaneta		0,7812	0	0
AOI_AMVA	1987_1995	Sabaneta	0,7812	1,0296	0,2484	0,03105
AOI_AMVA	1996_1998	Sabaneta	1,0296	1,5786	0,549	0,2745
AOI_AMVA	1999_2001	Sabaneta	1,5786	1,7577	0,1791	0,08955
AOI_AMVA	2002_2004	Sabaneta	1,7577	1,9728	0,2151	0,10755
AOI_AMVA	2005_2007	Sabaneta	1,9728	2,4282	0,4554	0,2277
AOI_AMVA	2008_2010	Sabaneta	2,4282	2,7	0,2718	0,1359
AOI_AMVA	2011_2013	Sabaneta	2,7	2,8998	0,1998	0,0999
AOI_AMVA	2014_2016	Sabaneta	2,8998	3,0681	0,1683	0,08415
AOI_AMVA	2017_2019	Sabaneta	3,0681	3,2742	0,2061	0,10305
AOI_AMVA	2020_2022	Sabaneta	3,2742	3,3561	0,0819	0,04095
AOI_AMVA	2023_2025	Sabaneta	3,3561	3,4839	0,1278	0,0639

Tabla 14. Resultados Fase 5_ Estadísticas zonales AOA_ Elaboración propia ArcGISPro; Excel; Entornos Python.

AOI	Periodo	Municipio Name	UrbInicial km2	UrbFina I km2	Delta km2	Delta Anual
AOI_AO A	1984_1986	Carmen De Viboral		0,7245	0	0
AOI_AO A	1987_1995	Carmen De Viboral	0,7245	0,8577	0,1332	0,01665
AOI_AO A	1996_1998	Carmen De Viboral	0,8577	1,1943	0,3366	0,1683
AOI_AO A	1999_2001	Carmen De Viboral	1,1943	1,3257	0,1314	0,0657
AOI_AO A	2002_2004	Carmen De Viboral	1,3257	1,4139	0,0882	0,0441
AOI_AO A	2005_2007	Carmen De Viboral	1,4139	1,6245	0,2106	0,1053

78

**ANÁLISIS MULTITEMPORAL COMPARATIVO DE LA EXPANSIÓN URBANA
(1984-2025) EN EL VALLE DE ABURRÁ Y EL ALTIPLANO DEL ORIENTE**

79

AOI_AO A	2008_201 0	Carmen De Viboral	1,6245	2,547	0,9225	0,46125
AOI_AO A	2011_201 3	Carmen De Viboral	2,547	2,7216	0,1746	0,0873
AOI_AO A	2014_201 6	Carmen De Viboral	2,7216	2,9925	0,2709	0,13545
AOI_AO A	2017_201 9	Carmen De Viboral	2,9925	3,303	0,3105	0,15525
AOI_AO A	2020_202 2	Carmen De Viboral	3,303	3,5316	0,2286	0,1143
AOI_AO A	2023_202 5	Carmen De Viboral	3,5316	4,2363	0,7047	0,35235
AOI_AO A	1984_198 6	Guarne		1,3176	0	0
AOI_AO A	1987_199 5	Guarne	1,3176	1,5795	0,2619	0,032737 5
AOI_AO A	1996_199 8	Guarne	1,5795	2,1096	0,5301	0,26505
AOI_AO A	1999_200 1	Guarne	2,1096	2,466	0,3564	0,1782
AOI_AO A	2002_200 4	Guarne	2,466	2,6433	0,1773	0,08865
AOI_AO A	2005_200 7	Guarne	2,6433	2,9403	0,297	0,1485
AOI_AO A	2008_201 0	Guarne	2,9403	3,4668	0,5265	0,26325
AOI_AO A	2011_201 3	Guarne	3,4668	3,9411	0,4743	0,23715
AOI_AO A	2014_201 6	Guarne	3,9411	4,509	0,5679	0,28395
AOI_AO A	2017_201 9	Guarne	4,509	4,9896	0,4806	0,2403
AOI_AO A	2020_202 2	Guarne	4,9896	5,3847	0,3951	0,19755
AOI_AO A	2023_202 5	Guarne	5,3847	6,3558	0,9711	0,48555
AOI_AO A	1984_198 6	La Ceja		0,8883	0	0
AOI_AO A	1987_199 5	La Ceja	0,8883	1,1025	0,2142	0,026775
AOI_AO A	1996_199 8	La Ceja	1,1025	1,6335	0,531	0,2655
AOI_AO A	1999_200 1	La Ceja	1,6335	1,7955	0,162	0,081

79

**ANÁLISIS MULTITEMPORAL COMPARATIVO DE LA EXPANSIÓN URBANA
(1984-2025) EN EL VALLE DE ABURRÁ Y EL ALTIPLANO DEL ORIENTE**

80

AOI_AO A	2002_200 4	La Ceja	1,7955	1,9908	0,1953	0,09765
AOI_AO A	2005_200 7	La Ceja	1,9908	2,5749	0,5841	0,29205
AOI_AO A	2008_201 0	La Ceja	2,5749	2,9925	0,4176	0,2088
AOI_AO A	2011_201 3	La Ceja	2,9925	3,231	0,2385	0,11925
AOI_AO A	2014_201 6	La Ceja	3,231	3,4749	0,2439	0,12195
AOI_AO A	2017_201 9	La Ceja	3,4749	3,8592	0,3843	0,19215
AOI_AO A	2020_202 2	La Ceja	3,8592	4,1031	0,2439	0,12195
AOI_AO A	2023_202 5	La Ceja	4,1031	4,7691	0,666	0,333
AOI_AO A	1984_198 6	La Unión		0,5229	0	0
AOI_AO A	1987_199 5	La Unión	0,5229	0,621	0,0981	0,012262 5
AOI_AO A	1996_199 8	La Unión	0,621	0,7776	0,1566	0,0783
AOI_AO A	1999_200 1	La Unión	0,7776	0,8127	0,0351	0,01755
AOI_AO A	2002_200 4	La Unión	0,8127	0,8874	0,0747	0,03735
AOI_AO A	2005_200 7	La Unión	0,8874	0,9486	0,0612	0,0306
AOI_AO A	2008_201 0	La Unión	0,9486	1,0125	0,0639	0,03195
AOI_AO A	2011_201 3	La Unión	1,0125	1,0818	0,0693	0,03465
AOI_AO A	2014_201 6	La Unión	1,0818	1,143	0,0612	0,0306
AOI_AO A	2017_201 9	La Unión	1,143	1,2195	0,0765	0,03825
AOI_AO A	2020_202 2	La Unión	1,2195	1,2879	0,0684	0,0342
AOI_AO A	2023_202 5	La Unión	1,2879	1,4706	0,1827	0,09135
AOI_AO A	1984_198 6	Marinilla		0,6624	0	0
AOI_AO A	1987_199 5	Marinilla	0,6624	0,8172	0,1548	0,01935

80

**ANÁLISIS MULTITEMPORAL COMPARATIVO DE LA EXPANSIÓN URBANA
(1984-2025) EN EL VALLE DE ABURRÁ Y EL ALTIPLANO DEL ORIENTE**

81

AOI_AO A	1996_199 8	Marinilla	0,8172	1,3041	0,4869	0,24345
AOI_AO A	1999_200 1	Marinilla	1,3041	1,5588	0,2547	0,12735
AOI_AO A	2002_200 4	Marinilla	1,5588	1,6821	0,1233	0,06165
AOI_AO A	2005_200 7	Marinilla	1,6821	1,8396	0,1575	0,07875
AOI_AO A	2008_201 0	Marinilla	1,8396	2,4498	0,6102	0,3051
AOI_AO A	2011_201 3	Marinilla	2,4498	2,61	0,1602	0,0801
AOI_AO A	2014_201 6	Marinilla	2,61	2,8278	0,2178	0,1089
AOI_AO A	2017_201 9	Marinilla	2,8278	3,195	0,3672	0,1836
AOI_AO A	2020_202 2	Marinilla	3,195	3,3678	0,1728	0,0864
AOI_AO A	2023_202 5	Marinilla	3,3678	3,8466	0,4788	0,2394
AOI_AO A	1984_198 6	El Retiro		0,6354	0	0
AOI_AO A	1987_199 5	El Retiro	0,6354	0,774	0,1386	0,017325
AOI_AO A	1996_199 8	El Retiro	0,774	1,089	0,315	0,1575
AOI_AO A	1999_200 1	El Retiro	1,089	1,3095	0,2205	0,11025
AOI_AO A	2002_200 4	El Retiro	1,3095	1,4148	0,1053	0,05265
AOI_AO A	2005_200 7	El Retiro	1,4148	1,9395	0,5247	0,26235
AOI_AO A	2008_201 0	El Retiro	1,9395	2,3616	0,4221	0,21105
AOI_AO A	2011_201 3	El Retiro	2,3616	2,592	0,2304	0,1152
AOI_AO A	2014_201 6	El Retiro	2,592	2,8899	0,2979	0,14895
AOI_AO A	2017_201 9	El Retiro	2,8899	3,2211	0,3312	0,1656
AOI_AO A	2020_202 2	El Retiro	3,2211	3,4578	0,2367	0,11835
AOI_AO A	2023_202 5	El Retiro	3,4578	3,8943	0,4365	0,21825

81

**ANÁLISIS MULTITEMPORAL COMPARATIVO DE LA EXPANSIÓN URBANA
(1984-2025) EN EL VALLE DE ABURRÁ Y EL ALTIPLANO DEL ORIENTE**

82

AOI_AO A	1984_198 6	Rionegro		4,518	0	0
AOI_AO A	1987_199 5	Rionegro	4,518	5,6412	1,1232	0,1404
AOI_AO A	1996_199 8	Rionegro	5,6412	7,3449	1,7037	0,85185
AOI_AO A	1999_200 1	Rionegro	7,3449	8,0982	0,7533	0,37665
AOI_AO A	2002_200 4	Rionegro	8,0982	8,8794	0,7812	0,3906
AOI_AO A	2005_200 7	Rionegro	8,8794	9,8775	0,9981	0,49905
AOI_AO A	2008_201 0	Rionegro	9,8775	11,6073	1,7298	0,8649
AOI_AO A	2011_201 3	Rionegro	11,6073	12,6864	1,0791	0,53955
AOI_AO A	2014_201 6	Rionegro	12,6864	13,8033	1,1169	0,55845
AOI_AO A	2017_201 9	Rionegro	13,8033	14,9427	1,1394	0,5697
AOI_AO A	2020_202 2	Rionegro	14,9427	15,84	0,8973	0,44865
AOI_AO A	2023_202 5	Rionegro	15,84	17,748	1,908	0,954
AOI_AO A	1984_198 6	San Vicente		0,2772	0	0
AOI_AO A	1987_199 5	San Vicente	0,2772	0,324	0,0468	0,00585
AOI_AO A	1996_199 8	San Vicente	0,324	0,4941	0,1701	0,08505
AOI_AO A	1999_200 1	San Vicente	0,4941	0,5526	0,0585	0,02925
AOI_AO A	2002_200 4	San Vicente	0,5526	0,5724	0,0198	0,0099
AOI_AO A	2005_200 7	San Vicente	0,5724	0,6588	0,0864	0,0432
AOI_AO A	2008_201 0	San Vicente	0,6588	0,9558	0,297	0,1485
AOI_AO A	2011_201 3	San Vicente	0,9558	1,0449	0,0891	0,04455
AOI_AO A	2014_201 6	San Vicente	1,0449	1,1439	0,099	0,0495
AOI_AO A	2017_201 9	San Vicente	1,1439	1,3149	0,171	0,0855

82

**ANÁLISIS MULTITEMPORAL COMPARATIVO DE LA EXPANSIÓN URBANA
(1984-2025) EN EL VALLE DE ABURRÁ Y EL ALTIPLANO DEL ORIENTE**

AOI_AO A	2020_202 2	San Vicente	1,3149	1,4859	0,171	0,0855
AOI_AO A	2023_202 5	San Vicente	1,4859	1,8954	0,4095	0,20475
AOI_AO A	1984_198 6	Santuario		0,4167	0	0
AOI_AO A	1987_199 5	Santuario	0,4167	0,5247	0,108	0,0135
AOI_AO A	1996_199 8	Santuario	0,5247	0,6786	0,1539	0,07695
AOI_AO A	1999_200 1	Santuario	0,6786	0,7488	0,0702	0,0351
AOI_AO A	2002_200 4	Santuario	0,7488	0,8028	0,054	0,027
AOI_AO A	2005_200 7	Santuario	0,8028	0,8991	0,0963	0,04815
AOI_AO A	2008_201 0	Santuario	0,8991	1,0071	0,108	0,054
AOI_AO A	2011_201 3	Santuario	1,0071	1,0512	0,0441	0,02205
AOI_AO A	2014_201 6	Santuario	1,0512	1,1097	0,0585	0,02925
AOI_AO A	2017_201 9	Santuario	1,1097	1,2393	0,1296	0,0648
AOI_AO A	2020_202 2	Santuario	1,2393	1,3095	0,0702	0,0351
AOI_AO A	2023_202 5	Santuario	1,3095	1,5219	0,2124	0,1062

Tabla 15. Resultados Fase Validación del clasificador_ AOI_ Total_ Elaboración propia ArcGISPro; Excel; Entornos Python.

binario	referencia	OA	precisión	recall	F1	IoU	kappa	err_comision	err_omision
UrbBinNR_1984_1986.tif	GHSL_built_m2_1990.tif	0,73187	0,909	0,08801	0,16	0,0872	0,11498	0,09101	0,91199
UrbBinNR_1987_1995.tif	GHSL_built_m2_1990.tif	0,73618	0,9021	0,10539	0,189	0,1042	0,1361	0,09791	0,89461
UrbBinNR_1996_1998.tif	GHSL_built_m2_2000.tif	0,72772	0,9096	0,12186	0,215	0,1204	0,15377	0,09037	0,87814
UrbBinNR_1999_2001.tif	GHSL_built_m2_2000.tif	0,72978	0,9058	0,13001	0,227	0,1283	0,16313	0,09425	0,86999
UrbBinNR_2002_2004.tif	GHSL_built_m2_2000.tif	0,73114	0,9026	0,13555	0,236	0,1336	0,16935	0,09744	0,86445
UrbBinNR_2005_2007.tif	GHSL_built_m2_2000.tif	0,73371	0,8972	0,14607	0,251	0,1437	0,18111	0,10278	0,85393
UrbBinNR_2008_2010.tif	GHSL_built_m2_2015.tif	0,72643	0,9008	0,15321	0,262	0,1507	0,18701	0,09917	0,84679

**ANÁLISIS MULTITEMPORAL COMPARATIVO DE LA EXPANSIÓN URBANA
(1984-2025) EN EL VALLE DE ABURRÁ Y EL ALTIPLANO DEL ORIENTE**

UrbBinNR_2008_2 010.tif	WSF2015_built_10m.tif	0,952 22	0,8176	0,537 15	0,64 8	0,47 9	0,623 9	0,18239	0,46285
UrbBinNR_2011_2 013.tif	GHSL_built_m2_2015.tif	0,728 06	0,8992	0,159 31	0,27 1	0,15 65	0,193 8	0,10076	0,84069
UrbBinNR_2011_2 013.tif	WSF2015_built_10m.tif	0,953 22	0,8138	0,556 91	0,66 1	0,49 39	0,637 09	0,18625	0,44309
UrbBinNR_2014_2 016.tif	GHSL_built_m2_2015.tif	0,730 07	0,8972	0,166 97	0,28 2	0,16 38	0,202 24	0,10285	0,83303
UrbBinNR_2014_2 016.tif	WSF2015_built_10m.tif	0,953 93	0,8047	0,578 54	0,67 3	0,50 73	0,649 07	0,19528	0,42146
UrbBinNR_2017_2 019.tif	GHSL_built_m2_2020.tif	0,725 96	0,8999	0,171 7	0,28 8	0,16 85	0,206 11	0,10005	0,8283
UrbBinNR_2017_2 019.tif	WSF2015_built_10m.tif	0,953 59	0,7884	0,593 24	0,67 7	0,51 18	0,652 58	0,21159	0,40676
UrbBinNR_2017_2 019.tif	WorldCover2021_built_10m.tif	0,966 76	0,7353	0,728 55	0,73 2	0,57 72	0,714 2	0,26469	0,27145
UrbBinNR_2020_2 022.tif	GHSL_built_m2_2020.tif	0,726 81	0,8949	0,175 92	0,29 4	0,17 24	0,210 1	0,10513	0,82408
UrbBinNR_2020_2 022.tif	WSF2015_built_10m.tif	0,953 14	0,7763	0,601 91	0,67 8	0,51 29	0,653 24	0,2237	0,39809
UrbBinNR_2020_2 022.tif	WorldCover2021_built_10m.tif	0,966 29	0,7247	0,739 85	0,73 2	0,57 75	0,714 19	0,27534	0,26015
UrbBinNR_2023_2 025.tif	GHSL_built_m2_2020.tif	0,727 82	0,8824	0,182 71	0,30 3	0,17 84	0,215 72	0,11758	0,81729
UrbBinNR_2023_2 025.tif	WorldCover2021_built_10m.tif	0,964 39	0,6991	0,751 74	0,72 4	0,56 8	0,705 47	0,30089	0,24826
	Promedios	0,820 96	0,848	0,341 23	0,42 5	0,29 68	0,374 16	0,15197	0,65877