

Artículo de Investigación

Aplicación de Teledetección para el Reconocimiento de Patrones de crecimiento en Asentamientos Carenciados en Colombia

Orlando Rincón Arango¹, Sandra Yanet Velazco Florez²

¹ Docente de planta Universidad de La Salle; orincon@unisalle.edu.co

² Docente de planta Universidad de La Salle; svelazco@unisalle.edu.co

* Correspondence: svelazco@unisalle.edu.co

Received: 15/06/2021; Accepted: 18/09/2021; Published: 30/12/2021

Resumen:

El surgimiento de asentamientos informales en Colombia es muy común. Muchas ciudades presentan este fenómeno, principalmente como resultado del conflicto armado que se ha vivido internamente en los últimos 40 años, impactando fuertemente en las zonas rurales y ocasionando masivos desplazamientos a las zonas urbanas, alterado significativamente las condiciones del territorio y su ocupación. Esta problemática genera gran preocupación para los gobiernos, ya que, debido a su rápido crecimiento, en muchos casos no se cuenta con un mínimo de información para tomar decisiones orientadas a garantizar la integridad física y la calidad de vida de quienes residen en estos asentamientos. El objetivo de este estudio es el de generar un reconocimiento y diagnóstico rápido y significativo de asentamientos informales, mediante la implementación de herramientas de Teledetección de bajo costo no invasivas (imágenes libres de uso abierto y Vuelos de vehículo aéreo no tripulado (VANT/RPAS/DRON). Con la comparación de dos eventos presentados en épocas distintas, uno de hace 20 años y otro con un emplazamiento no mayor a 10 años, se identificaron una serie de patrones de crecimiento comparando estas dos tipologías, identificando un periodo estable de consolidación de estos. Se concluye que, con la implementación de la Teledetección, se pueden identificar patrones de crecimiento y evolución de cualquier asentamiento desde su etapa de emplazamiento hasta evidenciar su normalización o consolidación y demás características que identifiquen plenamente este tipo de eventos que modifican gradualmente en el crecimiento urbano.

Key Words.

Asentamiento informales, Teledetección, Resolución Espacial, Imágenes Satelitales.

1. Aspectos generales

1.1 Generalidades de Asentamientos

De acuerdo con Urazan-Bonells, C., et al.[1], los procesos de migración campo-ciudad, o rural-urbano, definen desde hace varias décadas lo que se ha denominado fenómeno de la Urbanización, explicado como el aumento porcentual de población urbana respecto de la rural en un país o región

determinada. Esa migración se explica principalmente por dos causas, primero, la búsqueda de mejores condiciones de vida (ejemplificada en los procesos de revolución industrial en los cuales la población rural se traslada a las ciudades en busca de oportunidades laborales); y segundo, los lamentables escenarios de conflicto armado en los cuales la población se ve forzada a migrar.

En el caso de Colombia se han identificado algunas condiciones de orden tipológico que caracterizan los asentamientos informales [2], destacándose tres procesos básicos que definen la construcción de la ciudad: Urbanización, Parcelación y Edificación; y por tanto, como consecuencia de esos eventos informales de ocupación del territorio ese orden lógico de construcción se ve alterado, conllevando normalmente a implementar los procesos de parcelación y edificación antes que el de urbanización, lo que deriva en un desarrollo de edificación temprana, previo a los procesos de urbanización y ocasionado problemas a futuro con la dotación de infraestructura de redes de servicios públicos, elementos que se dan por lo general tiempo después de pasado los procesos de edificación.

Una característica relevante referenciada en análisis previos realizados sobre asentamientos informales en Colombia, muestra que después de un periodo de 5 años desde su formación se evidencia su consolidación, es decir, la población comienza el proceso de mejora de las edificaciones, realizando una transición de las condiciones de edificación provisional (estructura en madera, zinc, plástico) hacia condiciones de edificación permanentes (estructura en mampostería y concreto), reflejando una tendencia diferente a lo que ocurre en asentamientos en otros lugares del mundo donde a pesar del paso de los años las condiciones de provisionalidad se mantienen con el tiempo.

Lo anterior propone un reto para las autoridades en orden de poder identificar condiciones de los asentamientos de forma rápida con el fin de poder actuar de forma concertada con las comunidades, con la finalidad de generar medidas tempranas antes de la consolidación del asentamiento, buscando una organización en sus estados iniciales, para que después si en un futuro se da un proceso de legalización, o de intervención, estos sean fáciles de realizar y se garanticen unas condiciones adecuadas.

Existen diferentes patrones o características iniciales posibles a observar en los asentamientos informales en etapas tempranas en el caso de Colombia: morfología, parcelación, trazado, tipo de predio, tipo de edificación. La parcelación tiene varios tipos comunes de resolución que como lo esboza Busquets[3], dos de estos tipos aplicarían de manera clara para el caso colombiano: la parcelación rústica y la compacta (ordenación planeada). La primera corresponde a aquellos asentamientos en donde se da una cierta aceptación de los accidentes naturales y se aprovechan los caminos rurales y servidumbres de paso existentes para generar una fragmentación del predio a partir del deslinde de vías adaptadas al terreno, lo cual da paso, por lo general a configuraciones irregulares. El segundo tipo de parcelación tiene que ver con procesos caracterizados por la existencia de una idea de ordenación de las parcelas (planteada por lo general por un promotor informal) que corresponde a una lógica de optimización en el uso del suelo (mayor cantidad de parcelas en un terreno), lo cual da como resultados trazados relativamente regulares que comúnmente ignoran condicionantes del terreno, como la pendiente y los accidentes naturales.

La parcelación rústica tiene por lo general una forma irregular, abierta y con tendencia a ramificaciones, mientras que la parcelación compacta planeada, presenta una forma predominantemente ortogonal, cerrada y con tendencia a consolidar polígonos de forma regular, como se pueden observar en la Figura 1. El trazado urbano termina de conformarse a partir de las vías, que en este tipo de asentamientos tienen diversas condiciones en términos de dimensiones y resolución técnica. Lo común en los casos de la parcelación rústica es que exista una estructura vial

compuesta por vías peatonales y vehiculares de mínima sección, dadas las limitaciones que la topografía y accidentes naturales pueden generar, cuestión que para el caso de la tipología compacta planeada es un poco diferente, ya que en esta se intenta garantizar el acceso vehicular a cada predio, generando entonces una oferta mayor de vías vehiculares de mínima sección.



Figura 1. a) Parcelación rustica b) parcelación compacta. Fuente: Autores.

En cuanto a la resolución técnica del trazado vial, debido a las condiciones de autoproducción de estos asentamientos, la construcción de las vías se da básicamente mediante el descapote, o retiro de la capa vegetal superficial del suelo, dejando expuestos materiales de subsuelo que por lo general deben ser recubiertos con una capa de agregados pétreos de baja calidad o con materiales granulares de baja especificación, que en la mayoría de los casos corresponden a escombros de construcción. En ciertos casos se adelantan procesos incipientes de nivelación para facilitar el acceso de vehículos motorizados. En la medida en que pasa el tiempo y el asentamiento se va consolidando, se empiezan implementar materiales de mejor calidad, como el cemento o el asfalto, tratando de generar una capa de rodadura apta para una buena circulación vehicular.

En cuanto a los tipos de predio en el caso de Colombia, la información disponible en general se enfoca en asentamientos periurbanos que se generan en las grandes ciudades, como es el caso expuesto por Tarchópulos y Ceballos [3], quienes generan aportaciones importantes con base en el análisis de casos en la ciudad de Bogotá, presentando una caracterización de gran cantidad de tipologías de vivienda de origen informal, donde se contempla la dimensión del predio como un aspecto importante. En este ejercicio se identifican diferentes proporciones de predio que corresponden en su mayoría a la forma rectangular, encontrando mayoritariamente dimensiones de frente de entre 5 y 7 metros y dimensiones de fondo de entre 10 y 15 metros. Dentro de estos rangos, hay una dimensión que sobresale por su recurrencia, sobre todo en tipologías de parcelación compacta planeada, y es la del predio de 6 metros de frente por 12 metros de fondo. Pero para el caso de asentamientos en formación en ciudades intermedias no céntricas del país, como Florencia (Caquetá) o Mocoa (Putumayo) donde los recursos son limitados y el desplazamiento elevado, la información es prácticamente nula. Finalmente, en cuanto al tipo de edificación, las dimensiones del predio determinan entonces las dimensiones de la vivienda, entendiéndose que en muchos casos esta termina por ocupar su totalidad luego de procesos de desarrollo progresivo de corto, mediano y largo plazo, principalmente en asentamientos de tipología compacta planeada. En otros casos, la ocupación del predio no es total dada la existencia de patio o, como sucede en ciertos casos que corresponden generalmente a la tipología rústica, la vivienda se implanta de manera aislada (separada) frente a las edificaciones vecinas, debido a la amplia dimensión del predio en donde se construye.

Los patrones de asentamiento de la población de acuerdo con Medellín [4], es un “modelo comprensivo de apropiación social del territorio”, determinado de un periodo específico de la historia, por lo que el análisis de sus variaciones temporales implica interpretaciones de procesos sucesivos de ajustes en relación de dominación entre la sociedad y la naturaleza, que se encuentra medido por la estructura económica y la organización social. Ahora bien y de acuerdo con lo anteriormente dicho, un estudio de la evolución del crecimiento de asentamientos en zonas selváticas tropicales como los que han aparecido en los últimos años en Colombia, donde no se dispone de mucha información y donde las interacciones han estado marcadas por unas condiciones sociales específicas de este periodo de tiempo en Latinoamérica, cobra relevancia, a fin de poder realizar una identificación de parámetros morfológicos y tendencias de crecimiento de estos asentamientos en su ciclo de desarrollo inicial (previo a la consolidación) durante los primeros 5 años, con el fin de evaluar si se conservan las tendencias de crecimiento observadas en los asentamientos que se desarrollaron en décadas previas en los grandes núcleos urbanos.

Para tal fin, en este estudio se analizó la viabilidad de utilizar herramientas de bajo costo (imágenes libres de uso abierto y Vuelos de vehículo aéreo no tripulado (VANT/RPAS/DRON). El estudio se realizó en el asentamiento El Paraíso, ubicado en la ciudad de Mocoa, Putumayo – Colombia (Figura 2), comparando su evolución con referencia al estado actual de un asentamiento periurbano ya consolidado por casi 20 años en la ciudad de Bogotá, Colombia (Figura 2 3).



Figura 2. Secuencia de imágenes VIS recuperadas de Google Earth del asentamiento Mocoa (a) 2001, (b) 2013, (c) 2017. Fuente: Autores.



Figura 3. Imagen VIS recuperadas Google Earth del asentamiento Bogotá (a) 2002 b) 2016 (b) 2021. Fuente: Autores

Este estudio se desarrolló mediante la implementación de sensores remotos lejanos y cercanos, buscando reducir las limitaciones impuestas por la nubosidad con la adquisición de imágenes visibles de mayor calidad en estas zonas selváticas tropicales, a fin de realizar una aproximación preliminar respecto a la identificación de patrones en asentamientos en estos entornos, explorar los criterios

expertos o reglas para definir las funciones discriminantes para estructuras e identificar los sistemas de clasificación de variables de interés, considerando las condiciones de este tipo de entornos y asentamientos de pequeño tamaño poco estudiados a nivel internacional.

De acuerdo con Swain [5], las funciones discriminantes adecuadas para la aplicación de sensores remotos en esquemas de clasificación de variables, se pueden estructurar o definir basados en consideraciones teóricas, criterio experto o intuición, pero en la mayoría de los casos se definen en función a un conjunto de patrones de entrenamiento. Así pues, se requiere de un marco inicial de base para poder entender cuáles son las variables significativas que deben ser seleccionadas, y su variaciones incidentales (ruido), y de esta manera establecer la viabilidad de aplicar sensores remotos para estudiar asentamientos en estados incipientes de desarrollo donde la resolución de los elementos visibles no es suficiente para establecer conjuntos de entrenamiento extensos debido a las limitaciones de resolución de las imágenes abiertas disponibles.

1.2 Generalidades de la Teledetección o Percepción Remota

La Teledetección o Percepción Remota (Remote Sensing), es “la ciencia de obtener información (imágenes) sobre la superficie de la Tierra sin estar en contacto con ella; esto se hace detectando y registrando la energía reflejada o emitida, para posteriormente ser procesada, analizada y aplicada”[6]. En efecto, para llevar a cabo la observación remota se requiere que exista una interacción de un flujo energético con las coberturas terrestres [7], esto es, que exista una correlación entre los objetos o elementos territoriales y el sensor a bordo de un satélite [8], el cual recoge y graba la radiación reflejada por esos objetos, permitiendo una distinción entre los mismos [9]. Una parte fundamental en la información que se obtiene a partir de los distintos sensores remotos es la resolución con que se alcanza[10]; por consiguiente, se puede hablar de cuatro tipos de resolución: espacial, espectral, radiométrica y temporal.

La resolución se define como la capacidad del sistema para presentar la información en la menor cantidad discretamente separable en términos de distancia (espacial), banda de longitud de onda de radiación electromagnética (espectral), tiempo (temporal) y / o cantidad de radiación (radiométrica)[11]. Estos tipos de resoluciones permiten discriminar la información a diferentes niveles de detalle[10]. El tipo de producto comúnmente suministrado por los satélites de teledetección es una imagen digital tipo ráster (forma de celdillas), donde cada celdilla o píxel tiene asignado uno o varios valores numéricos (niveles digitales, ND), que hacen referencia a la energía media recibida desde el objeto dentro de una determinada banda espectral[9]. Cuanto mayor sea el valor de ND mayor es la radiación que recibe el sensor[12]. Este producto tipo ráster, generalmente se incorpora junto a otros mapas obtenidos por métodos convencionales a un sistema de información sobre el territorio (por ejemplo, un SIG). El verdadero aprovechamiento de los productos actuales de la teledetección solo se da con el concurso de los SIG y sus capacidades de análisis y manejo de datos [13], convirtiéndola en la herramienta idónea para obtener capas de información espacial cuando las superficies son extensas, poco habitadas y escasamente cubiertas por la cartografía tradicional [12].

1.3 Dinámica temporal

Hoy en día, las ciencias de la información geográfica se enfocan en capturar el dinamismo de los entornos geográficos y describir la semántica de las entidades geográficas (objetos y eventos) y las relaciones espaciales entre estas a través del tiempo [14]. Uno de los aportes más destacados de la teledetección en estudios de cualquier ámbito, es su capacidad para seguir procesos dinámicos. Las imágenes obtenidas constituyen una fuente muy valiosa para estudiar los cambios que se producen en la superficie terrestre, ya sean debidos al ciclo estacional de las cubiertas, a catástrofes naturales o

a alteraciones de origen humano[15]. El tiempo es una dimensión fundamental para entender y modelar la evolución de los fenómenos geográficos, pues se considera que los fenómenos y actividades espacio-temporales dependen, directamente, de la transformación del espacio geográfico [16]. El crecimiento de asentamientos y la proliferación de nuevas construcciones, es dinámico y complejo, creando confusiones y duplicidades en la información de control y seguimiento que se efectúa. La aplicación de mecanismos para la identificación y cuantificación de estos asentamientos, así como el número de construcciones, superficie afectada y servicios, entre otros, complementada con la correspondientes afectaciones de recursos naturales y daños medioambientales permitirán un conocimiento más acoplado a la realidad y la utilización de criterios para la toma de decisiones, y la correspondiente actualización de la información espacio-temporal[17].

1.4 Fuente y calidad de los datos espaciales.

Desde el lanzamiento del primer satélite meteorológico de teledetección (TIROS-1) en 1960 y el primer satélite de recursos terrestres en 1972 (Landsat-1), se han lanzado varias plataformas con una variedad de sensores de teledetección para estudiar la cobertura terrestre, los océanos o monitorear el clima [11]. La altitud del sensor desempeña un papel importante para determinar la finalidad, por lo que, las imágenes modernas se capturan desde una amplia gama de altitudes que van desde el nivel del suelo a más de 36.000 kilómetros sobre la Tierra, ofreciendo distintas ventajas para diversas aplicaciones [18]. Puesto que los datos son la base de todo el trabajo que realizaremos, su calidad es vital para que ese trabajo tenga sentido y aporte unos resultados coherentes y útiles [13]. El uso de las herramientas de teledetección permite la implementación de una metodología flexible que se adapta a la realidad de distintos tipos de territorios al agrupar zonas por rangos particulares con distintos tipos de criterios físicos, económicos o sociales hasta determinar la aptitud y uso potencial del territorio. Estas zonas agrupadas y analizadas se convierten en la base de la planificación y de las propuestas para una mejor organización del territorio [19].

1.5 Reconocimiento de patrones de crecimiento

El desarrollo poblacional demanda una gran cantidad de servicios y recursos, lo cual puede llegar a impactar negativamente al ambiente y deteriorar la calidad de vida de sus habitantes cuando no se realiza de manera planificada [20]. Por tanto, es importante que las autoridades encargadas de la planificación territorial conozcan e implementen metodologías de planificación espacial para detectar y establecer las posibles modificaciones del crecimiento urbano para reorientar y minimizar los impactos bajo un contexto de sustentabilidad [21]. El patrón de localización de la población en el territorio tiene diversos determinantes que interactúan de manera compleja. Entre ellos están la base topográfica y geológica que define la aptitud del territorio para el asentamiento humano y las fuerzas económicas, sociales y políticas, que valorizan los espacios para las personas [22]. La cuantificación de cambios de uso de suelo a través de la teledetección junto con las herramientas de análisis que ofrecen los SIG para modelar los procesos de cambio es una forma muy eficaz para comprender la dinámica de cambio de un territorio [23]. Este proceso de cambio puede identificar las diferencias en el estado de un objeto o fenómeno observado en diferentes momentos [24].

La cartografía digital (tipo ráster) se muestra como una componente grafica esencial, que facilita un reconocimiento preliminar de la dinámica de cambio de un territorio y de sus características espaciales, temporales y de forma, evidenciando no solamente la topografía, también elementos como predios, manzanas, malla vial y demás presentes en el asentamiento humano [25]. Este tipo de material digital permite efectuar un análisis rápido y con gran precisión para dimensionar la problemática de todo un territorio y la definición de acciones en zonas específicas[17], además de

identificar, caracterizar y georreferenciar un asentamiento informal, es posible evidenciar otras características del emplazamiento, acceso a servicios básicos, hasta riesgos físicos y ambientales.

2. Materiales y Métodos

Fuentes de información

Como ya se mencionó, para el desarrollo del proyecto se privilegió el uso de información satelital de libre acceso, con el objetivo de realizar la validación de las posibilidades y/o limitaciones de aplicar de este tipo de datos ya sea de forma independiente o combinándola con información capturada mediante aeronaves no tripuladas, o mediante recorridos no estructurados a pie de terreno. Los resultados de este ejercicio permiten sentar las bases para el desarrollo a futuro de una metodología integrada de captura de datos que permita a municipios de recursos limitados aplicarla de forma rápida y con el menor costo posible, monitorear la evolución de asentamientos. Por lo tanto, inicialmente se revisaron en plataformas libres de observación del territorio a nivel global como *Google Earth*® (<https://earth.google.com>) plataforma que, a través de sus imágenes, permite hacer seguimiento multitemporal de diferentes eventos (naturales o antrópicos), ofreciendo una serie de imágenes satelitales como a nivel de terreno, en algunos casos mediante su modo *streetview*, lo que facilita una clara identificación y delimitación de las zonas de estudio.

En una segunda instancia, se revisaron plataformas más robustas que facilitan no solamente la visualización y observación de ese evento, igualmente permiten generar una serie de procesos a partir de la localización geográfica de este. Así, para este estudio, se implementaron plataformas libres tales como, *Satellites.pro* (<https://satellites.pro>), *SasPlanet* (<http://www.sasgis.org>), el software SIG libre *QGIS* (<https://qgis.org>) y así mismo el software propietario *ArcGIS* (<https://www.arcgis.com>), con el objeto de realizar validaciones.

Caracterización los asentamientos

Una vez recopilada la información de los asentamientos en estudio se procedió a realizar una valoración preliminar de características de estos, para establecer una línea base de comparación de comportamiento de crecimiento. Para el asentamiento de El Paraíso, que se ubicado en la ciudad de Mocoa, Putumayo; el cual se estableció a partir de la reubicación de 61 familias que residían en la tercera etapa del asentamiento Villa Rosa, afectado por fenómenos geoambientales ocurridos en 2012 en dicha ciudad. Lo anterior, facilito la definición de una ventana temporal de búsqueda de imágenes disponibles en la zona de interés, encontrando imágenes previas al establecimiento del asentamiento y una secuencia adecuada para analizar las tendencias de crecimiento en *Google Earth* (Figura 22). Para el caso del asentamiento de Bogotá, al tratarse ya de un asentamiento consolidado por más de 20 años, la información geoespacial disponible es limitada respecto a la fase de emplazamiento y formación del asentamiento, es así como las imágenes con resolución adecuada para identificar rasgos corresponden a la ventana de tiempo entre 2002 y 2021 (Figura 33), etapa de tiempo posterior a la consolidación del asentamiento. Sin embargo, estas imágenes resultan muy útiles en orden de establecer una línea base para comparar las tendencias de crecimiento entre los dos asentamientos, contrastando las tendencias en etapas diferentes de madurez, ya que, al tratarse de dos tipos de asentamientos periurbanos, este análisis servirá para entender y contrastar las dinámicas de crecimiento.

Así entonces, en orden de tener una primera caracterización de los asentamientos y un marco de comparación adecuada, se evaluaron como parámetros geométricos tales como perímetro, área, relaciones de ejes, y en una siguiente instancia se realizaron proceso de clasificación discriminado

áreas construidas probando diferentes indicios tales como el BSI (índice de área construida). Es importante observar, que para las etapas posteriores el desarrollo de este proceso de investigación, se requerirá analizar una serie de variables físicas, espacio-temporales y sociales. El análisis espacio-temporal permitirá entender aspectos tales como forma, localización, topografía, estructura y su relación con el entorno de la zona de estudio. Finalmente, el análisis social permitirá evidenciar el territorio y riesgo urbano del asentamiento y exposición a amenazas en su entorno y en su localización.

3. Resultados y discusión

Evolución del asentamiento

Primero se hizo un reconocimiento a partir de imágenes de las misiones *Landsat 8*, teniendo en cuenta que estas se disponen de un mayor rango temporal de escenas coincidentes con la aparición del asentamiento de Mocoa, respecto a otras misiones de observaciones de satélites tales como *Sentinel*. Si bien, la resolución espacial de imágenes de libre acceso de la misión *Landast 8*, es limitada (30m/píxel), limitando así, los análisis a pequeña escala para detección de rasgos u objetos de tamaños internos del asentamiento (vías, distribución de edificaciones), aunque de mucha utilidad para analizar la evolución de tamaño y la morfometría del área de implantación y como se desarrollan sus interrelaciones con el entorno circundante. Lo anterior, teniendo en cuenta que el área inicial de implantación del asentamiento puede estar entre 1 y 2 hectáreas, dependiendo del número de colonos o familias fundadoras del asentamiento, lo que facilitará su valoración usando este tipo de imágenes con resoluciones limitadas. Para el análisis se utilizaron las imágenes de *Landast 8* disponibles a través de *Earth Observation System*, <https://eos.com/company/>, que ofrece una versión re-muestreada (resampled) a 5m.

Con el objeto de verificar la evolución se realizó inicialmente la búsqueda de imágenes en una región de interés (ROI) 250000m², (625m x 400m), ubicada entre el límite urbano de la ciudad de Mocoa más cercano al asentamiento y una faja de 150 metros al oeste del asentamiento, con el objeto de poder verificar los cambios no solo del asentamiento sino en las zonas circundantes al mismo, a partir de esto se realizó la búsqueda de imágenes de buena calidad con una visibilidad adecuada de la zona entre 2013-2020, considerando que la zona de estudio se ubica en una región donde hay alta presencia de nubosidad durante la mayor parte del año. Como resultado de lo anterior se pudo compilar una secuencia de imágenes con un nivel de nitidez aceptable del asentamiento y con una frecuencia temporal anual (Figura 64).

A partir de la secuencia de imágenes se puede definir que el asentamiento fue implantado en el periodo entre mayo 5 y julio 24 de 2013, que el área inicial de selva afectada corresponde a 19600m², área que fue verificada a través de la imagen de alta resolución disponible en *Google earth* de diciembre de 2013.



Figura 4. Secuencia de consultas región de interés satélites Landsat 2013-2019. Fuente: Autores.

Los parámetros de la imagen visible en color natural analizado en el sistema de color CIE L*a*b demuestran que a partir de estas imágenes Landsat 8, obtenemos indicadores para analizar los cambios en las condiciones de la zona, encontrando variaciones de 22.84, 4.214, 9.965, en el año 2013 y para el 2019 valores de 30.08, 6.208, 10.40.

Así mismo se realizó un análisis morfométrico a fin de reconocer las características del cambio (figura 5).

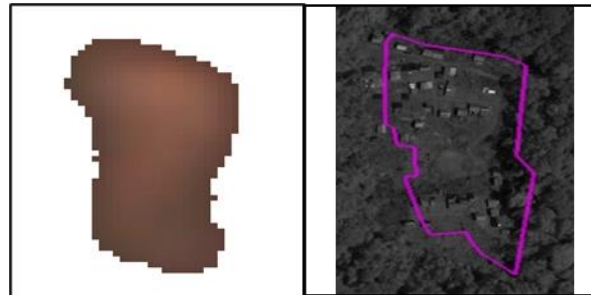


Figura 5. Comparación morfometría obtenida a) segmentación Landsat 2013/05 b) Google earth 2013/12. Fuente: Autores.

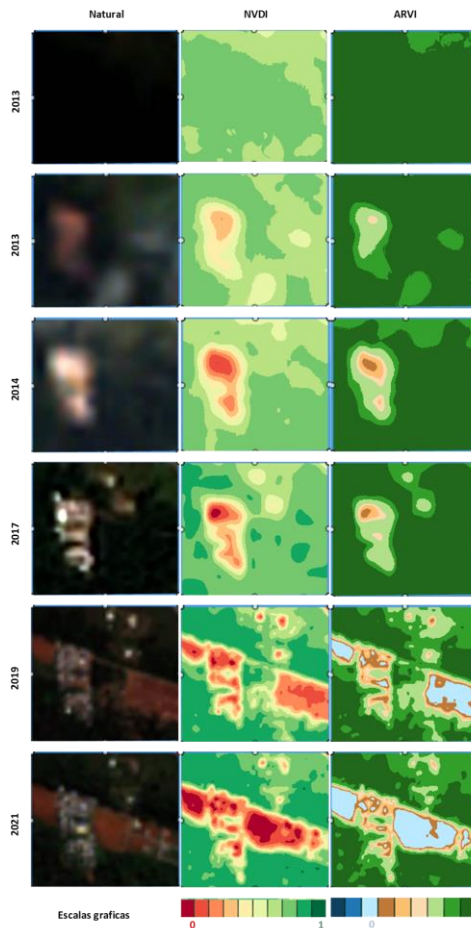


Figura 6. Asentamiento El Paríso, Mocoa. Secuencia Análisis de imágenes Landsat 8, 2013-2021. fuente: Autores

Además, se realizó un análisis del índice normalizado de diferencia de vegetación (ndvi) y el ARVI (Índice de Vegetación Resistente a la Atmósfera) en la zona del asentamiento. Los Índices de Vegetación, nos muestran nuevas imágenes a partir de cálculos entre diferentes bandas espectrales. Como resultado en esta nueva imagen se destacan gráficamente determinados píxeles relacionados con parámetros de las coberturas vegetales (densidad) no tan cambiantes en los últimos años. El análisis se hace con una secuencia de imágenes Landsat 8, 2013-2021, tomadas de *Earth Observation System* (<https://eos.com/company/>) (figura 6).

Este mismo procedimiento se aplicó al asentamiento de Bogotá. El análisis se hace sobre una secuencia de imágenes Landsat/Sentinel 2014-2021, tomadas de *Earth Observation System*, (<https://eos.com/company/>) (figura 7).

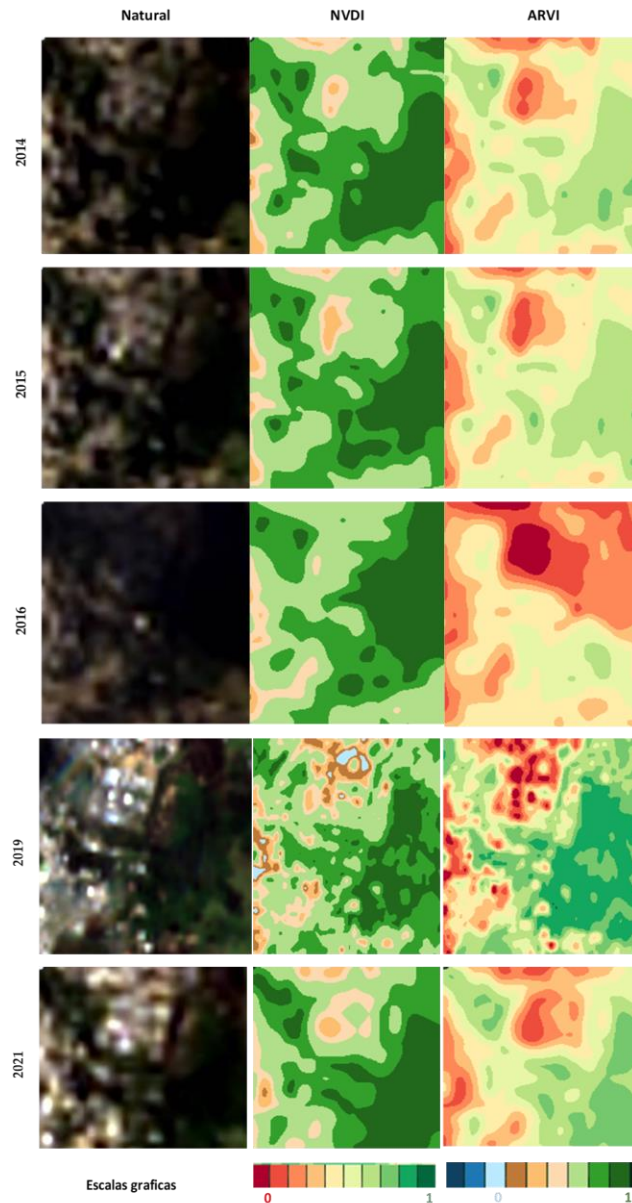


Figura 7. Asentamiento Bogotá. Secuencia Análisis de imágenes Landsat/Sentinel 2014-2021 fuente: Autores.

Otros tipo de análisis, implica un proceso de observación directa, mediante la implementación de imágenes de satélite, obtenidas desde diferentes plataformas, evidencia el establecimiento del asentamiento El Paraíso desde 2013 con una evolución más estable entre el 2017 y 2021, donde no se determinan cambios exagerados en su forma. En este sentido, la plataforma *Sas.Planet* nos ofrece una secuencia de observación más nítida, es decir, con mayor grado de detalle a partir de imágenes de Bing Satélite (véase figura 10a). Este grado de detalle se relaciona con la capacidad del sensor de discriminar la información a diferentes niveles de detalle, es decir su *resolución*. Otra imagen tomada desde *Esri satellite* nos ofrece menos resolución, menor calidad de detalle (véase figura 10b) y una tercera es tomada de la plataforma *satellites.pro*, nos muestra una imagen con mejores niveles de detalle (véase figura 10c) que la anterior, pero menos en comparación con la primera.



Figura 8. Discriminación en diferentes niveles de detalle, en relación con la resolución de la imagen. a) imagen obtenida desde la plataforma *Sas.Planet* - Bing satellite 2020. b) imagen obtenida desde la plataforma *Sas.Planet* - Esri satellite, 2020. c) imagen obtenida desde la plataforma *Satellite.Pro*, 2021.

Estas tomas, confirma que la evolución del asentamiento desde su establecimiento desde 2013 hasta 2021, se consolidó en los últimos cinco años, mostrando una estabilidad y consolidación en su forma desde 2020 a la fecha, sin alteraciones evidentes.

Area estimada de Construcción y asentamiento

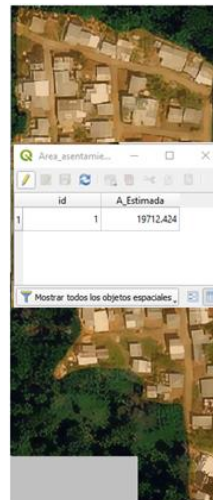


Figura 9. Área estimada de Construcción y asentamiento. a) Área estimada calculada desde Sas.Planet de 20,010.16m². b) Área estimada calculada desde QGIS de 19,712.424 m².

En primer lugar, teniendo en cuenta las plataformas de acceso libre *Sas.Planet* y *QGIS*, se obtiene un valor estimado de área de 20010.16 m² y de 19,712.424 m², respectivamente (figura 10).

Ahora, con la implementación del software propietario *ArcMap 10.7* (propiedad *Esri*) se generó una reclasificación por rangos de valores individuales, agrupando dos áreas de afectación como son las zonas verdes y las zonas de ocupación (construcción y vías). Con lo anterior, se pudo establecer un área estimada de ocupación de 10,748.103601 m², más un área estimada de zonas verdes de 9,096.487159 m², para un total de área estimada del asentamiento de 19,844.59076 m² (figura 11).

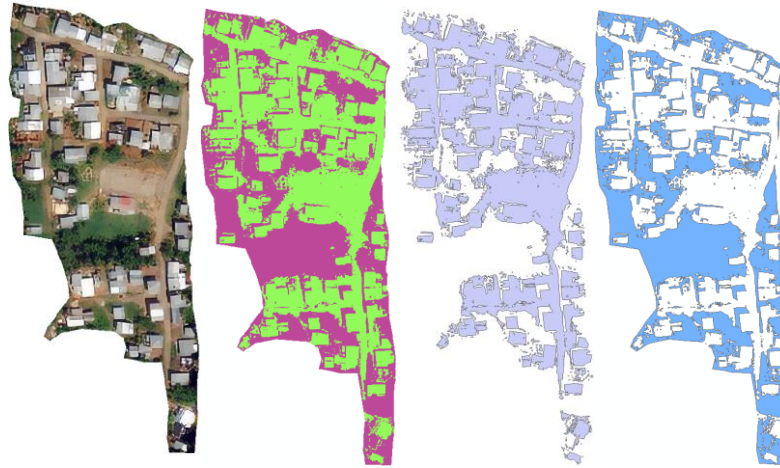


Figura 10. a) asentamiento El Paraíso. b) Área estimada del asentamiento de 19,844.59076m². c) área estimada de ocupación de 10,748.103601m². d) área estimada de zonas verdes de 9,096.4871m².

El valor generado de área estimada, por este método de reclasificación nos da una valor muy cercano de entre los valores de área estimada calculadas por las plataformas libres *Sas.Planet* de 20010.16 m² y la plataforma *QGIS* de 19,712.424 m².

En cuanto al asentamiento en Bogotá, se obtiene un valor estimado de área de 17,108.1 m², con una ocupación estimada de 8252.3 m² y de zonas verdes de 8855.8 m² (véase figura 12).



Figura 11 a) Asentamiento Bogotá 2021 con un área estimada de 17108.1 m². b) área estimada de ocupación de 8252.3 m². d) área estimada de zonas verdes de 8855.8 m².

Morfología espacial y Urbana

Ahora, dentro de este proceso de observación se continua con un estudio exploratorio enfocado en la forma. En este sentido, se identifican los tipos de construcción predominantes en este asentamiento. La implementación de imágenes de satélite nos permite hacernos una idea sobre la forma, vías, localización y área de ocupación construida, aunque la observación directa, in situ, facilitará un reconocimiento más acertado de su morfología. Tanto la forma del trazado como la función que cumplen sus calles, al igual que las construcciones allí asentadas, inciden de forma directa en el funcionamiento de este espacio urbano, en sus propias características como comunidad y su disposición de uso para sus habitantes (figura 13).

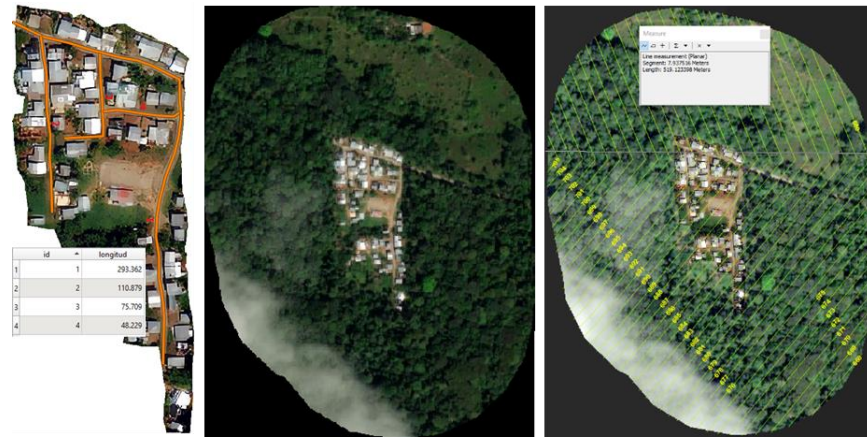


Figura 12. a) asentamiento El Paraíso, con trazado vial en parcelación rustica. b) Zona de emplazamiento, selva tropical. c) Nivel del terreno plano.

5. Conclusiones

Se comprobó que el uso de la Teledetección para monitorear la evolución de asentamientos informales resulta ser una herramienta practica y eficiente. Se estableció que las imágenes satelitales obtenidas de misiones como Landsat 8, son una gran alternativa que ofrece buenas características de resolución espacial, cuando la escena requerida se encuentra fuera de su resolución temporal.

Mediante el análisis realizado, se comprueba que la evolución del asentamiento El Paraíso desde su establecimiento en 2013 hasta 2021, se consolidó en los últimos cinco años, mostrando una estabilidad en su forma desde 2019 a la fecha, sin alteraciones evidentes. Al contrastar la tendencia de crecimiento con el de Bogotá no se observan cambios significativo en el de El Paraíso.

Por otra parte, los índices de área construida generados a partir de operaciones con bandas (NDVI y ARVI) brindan como resultado un ráster, el cual permite clasificar rangos de pixeles a criterio del usuario o de forma automática. Estos índices logran identificar el área del asentamiento de forma general, logrando detallar la discretización de texturas dentro del asentamiento, mostrando un desempeño notablemente mejor en la comparación de la tipologías.

Se evidenció que con la implementación de imágenes de satélite obtenidas desde diferentes plataformas se puede hacer un seguimiento de la evolución de asentamientos desde sus emplazamiento hasta su consolidación, mediante un análisis de observación espacio-temporal, destacando características esenciales en la evolución de cualquier asentamientos, como forma, estructura, densidad, distribución, localización, vegetación, etc.

Referencias Bibliográficas

- [1] C. Urazan-Bonells, M. LondoÑO, O. Rincon-Arango, C. Agudelo-Rodriguez, and M. Sanabria-Buitrago, "Uso de equipos de teledetección para analizar condiciones de movilidad en asentamientos carenciados," *Espacios*, vol. 41, pp. 181-199, 11/26 2020.
- [2] D. Tarchopulos, *Patrones Urbanísticos y Arquitectónicos en la Vivienda dirigida a los Sectores de Bajos Ingresos en Bogotá*, 2018.
- [3] J. Busquets, *La urbanización marginal: Edicions UPC*, 1999.
- [4] F. Medellín, "Patron de asentamiento poblacional: Reflexiones en torno al entorno," in *Seminario Taller Población, Medio Ambiente y Desarrollo*, Bogotá, 1993.
- [5] P. H. Swain, "Pattern recognition: A basis for remote sensing data analysis," 1972.
- [6] N.-C. C. f. M. a. E. Observation., "Fundamentals of Remote Sensing," in *Remote Sensing Tutorials*, N. R. Canada, Ed., ed. Ottawa, 2019.
- [7] C. M. N. Á. L. Pérez Gutiérrez, *Teledetección : nociones y aplicaciones*. [S.l.]: [s.n.], 2002.
- [8] M. A. B. P. C. M. López-Vázquez, *Fundamentos de las Infraestructuras de Datos Espaciales (IDE): BibliotecaOnline SL*.
- [9] M. Labrador García, J. Brondo, and M. Arbelo, *Satélites de teledetección para la gestión del territorio*, 2012.
- [10] J. M. A. W. Plata, T. D. Guzmán, A. R. Tierra, "La toma de datos geográficos," in *Fundamentos de las Infraestructuras de Datos Espaciales (IDE)*, ed: BibliotecaOnline SL, 2012.
- [11] S. Aggarwal, "Earth Resource Satellite," in *Satellite Remote Sensing and GIS Applications in Agriculture Meteorology*. Dehra Dun India, 2003.
- [12] SIGMUR. (2003, 2021/10/20). *SIG y Teledetección en la Universidad de Murcia*.
- [13] V. Olaya, *Sistemas de Información Geográfica: CreateSpace Independent Publishing Platform*, 2016.
- [14] M.-R. Miguel Alejandro and L. Serguei, "Modelo conceptual de entornos geográficos dinámicos," *Ingeniería, Investigación y Tecnología*, vol. 15, pp. 163-174, 2014.
- [15] O. Riaño M, "Consideraciones y métodos para la detección de cambios empleando imágenes de satélite en el municipio de Paipa," *Colombia forestal*, vol. 7, pp. 41-62, 01/01 2002.
- [16] W. Shuo, K. Nakayama, Y. Kobayashi, and M. Maekawa, "Considering events and processes within GIS: an event-based spatiotemporal data model," in *IEEE International Symposium on Communications and Information Technology*, 2004. ISCIT 2004., 2004, pp. 770-773 vol.2.
- [17] PAOT, "Estudio sobre el ordenamiento, control y tratamiento integral de los Asentamientos Humanos Irregulares, ubicados en suelo de conservación del Distrito Federal," *Procuraduría Ambiental y del Ordenamiento Territorial del DF2010*.
- [18] C. Brown and C. Harder, *The ArcGIS Imagery Book: New View, New Vision: Esri Press*, 2016.

- [19] M. A. Pérez. Aplicación de los sistemas de información geográfica como herramienta para la planificación territorial dentro de una metodología ajustada a la parroquia Macuma. Tesis de maestría, Universidad San Francisco de Quito, 2012. <http://repositorio.usfq.edu.ec/handle/23000/2077>.
- [20] USGS Science for a changing World. (1999). Analyzing land use change in urban environments. USGS. U. S. Geological Survey.
- [21] M. J. Jiménez-Moreno, M. González-Guillen, M. Escalona-Maurice, J. R. Valdez-Lazalde, C. A. Aguirre-Salado. "Comparación de métodos espaciales para detectar cambios en el uso del suelo urbano". Revista Chapingo serie ciencias forestales y del ambiente, 17(3), pp. 389-406, 2011.
- [22] CEPAL – Naciones Unidas, "Capítulo III: Migración y redistribución espacial de la población: tendencias generales e interrelaciones específicas", en Población, territorio y desarrollo sostenible. Chile, 2012, Pg. 23.
- [23] O. Pineda, "Análisis de cambio de uso de suelo mediante Percepción Remota en el municipio de Valle de Santiago", tesis maestría, Centro de Investigación en Geografía y Geomática, México, 2011.
- [24] J. théau. "Change Detection", in Springer Handbook of Geographic Information. New York: Springer, 2012, pp. 175-183. DOI 10.1007/978-3-540-72680-7.
- [25] D. A. Tapias. "Asentamientos humanos Los Acacios". Tesis de Maestría, Universidad Santo Tomás. 2017.