Universidad Distrital
Francisco José de Caldas

Facultad de Ingeniería

Ingeniería Catastral y Geodesia

TRABAJO DE GRADO EN LA MODALIDAD DE MONOGRAFÍA PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE INGENIERA CATASTRAL Y GEODESTA

Procesamiento digital de imágenes aplicado a la formación catastral de asentamientos informales en proceso de legalización, caso de estudio municipio Sabana de Torres, departamento de Santander, Colombia.

Autor:
Paula Sofía Arias Garzón – 20171025114

Director:
Doctor Johan Andres Avendaño Arias

Bogotá D.C - Octubre 2022

Agradecimientos

A mis padres Gabriel Arias y Alba Garzón ustedes siempre han sido el motor que impulsa mis sueños y esperanzas, quienes estuvieron siempre a mi lado en los días y noches más difíciles. A mi mamá por toda la paciencia, el amor y las preocupaciones ella siempre supo que yo podría, a mi papá que desde el cielo me guía y protege le agradezco toda la fuerza que siempre me inculco. A mis hermanos Jenny y Eduardo por ser mis cómplices de vida, apoyándome y colaborándome para ser mejor cada día, siendo un ejemplo a seguir para mí. A mi sobrina Isabella, quien también fue parte de todo el proceso universitario, espero ser un buen ejemplo para ella y que persiga aquello que su corazón anhela.

A mi amigo Yosef Cortes por ser un apoyo incondicional tanto dentro como fuera de las aulas, a los amigos y compañeros que en algún momento de la carrera me brindaron su ayuda, sin ustedes nada de esto sería posible.

Al director de esta tesis Johan Avendaño por mostrarnos que somos capaces de lograr grandes cosas, que con esfuerzo y perseverancia podemos alcanzar todo lo que deseamos, gracias por incentivar en muchos de nosotros el deseo por investigar. A los docentes que con su vocación y amor me enseñaron lo importante que es la Ingeniería Catastral y Geodesia en el desarrollo de la sociedad.

A mi alma máter la Universidad Distrital Francisco José de Caldas por brindarme la oportunidad de estudiar, de crecer personal e intelectualmente, de compartir con personas espectaculares e incluso lograr conocer otros lugares del mundo. Finalmente, a la educación pública por ser la herramienta con la que muchas familias cambian sus vidas.

Índice

1. Introducción **8**

2. Planteamiento del problema **8**

3. Justificación **9**

4. Objetivos **10**
4.1. Objetivo general . . . 10
4.2. Objetivos específicos . . . 10

5. Marco de Referencia **10**
5.1. Marco Teórico Conceptual . . . 11
5.1.1. Asentamientos informales . . . 11
5.1.2. Catastro multipropósito . . . 11
5.1.3. Proceso de formación catastral . . . 12
5.1.4. Teledetección . . . 13
5.1.5. Sensores . . . 14
5.1.6. Imágenes satelitales . . . 16
5.1.7. Procesamiento digital de imágenes . . . 18
5.1.8. Fusión de imágenes . . . 19
5.1.9. Índices de calidad de imágenes . . . 20
5.1.10. Índices espectrales . . . 21
5.1.11. Clasificación supervisada . . . 22
5.1.12. Softwares implementados . . . 23
5.2. Estado del arte y Antecedentes . . . 25

6. Marco metodológico **29**
6.1. Fase 1. Base metodológica . . . 30
6.1.1. Caracterización de la zona de estudio . . . 30
6.1.2. Insumos requeridos . . . 30
6.2. Fase 2. Implementación metodológica . . . 30
6.2.1. Preprocesamiento . . . 30
6.2.2. Fusión de imágenes . . . 36
6.2.3. Cálculo de índices espectrales . . . 38
6.2.4. Postprocesamiento de los índices espectrales . . . 39
6.3. Fase 3. Validación de los resultados obtenidos . . . 42
6.3.1. Clasificación supervisada . . . 42
6.3.2. Verificación en campo . . . 42

7. Desarrollo **43**
7.1. Fase 1. Base metodológica . . . 43
7.1.1. Caracterización de la zona de estudio . . . 43
7.1.2. Insumos requeridos . . . 46
7.2. Fase 2. Implementación metodológica . . . 47
7.2.1. Preprocesamiento . . . 47

7.2.2. Fusión de imágenes . . . 55
7.2.3. Cálculo de índices espectrales . . . 59
7.2.4. Postprocesamiento de los índices espectrales . . . 61
7.3. Fase 3. Validación de los resultados obtenidos . . . 66
7.3.1. Clasificación supervisada . . . 66
7.3.2. Verificación en campo . . . 67

8. Conclusiones **69**

Referencias **72**

Índice de cuadros

1. Parámetros de la misión WorldView-3 . . . 15
2. Parámetros de la misión PlanetScope . . . 15
3. Clases de extracción por atributos de índices espectrales . . . 41
4. Situación de la Actualización Catastral . . . 44
5. Índices de calidad de imágenes - Adquisición de riqueza espectral. . . . 58
6. Índices de calidad de imágenes - Adquisición de riqueza espacial. . . . 59

Índice de figuras

1. Catastro multipropósito . . . 12
2. Componentes de un sistema de teledetección . . . 14
3. Píxeles . . . 16
4. Imagen pancromática . . . 17
5. Imagen multiespectral . . . 18
6. Flujograma de Procesos . . . 29
7. Reproyección escena satelital WorldView 3 . . . 31
8. Selección del Inquire Box . . . 32
9. Subset Image . . . 32
10. Re-Escalamiento del número de bits de la escena satelital PlanetScope . . . 33
11. Resampleo de píxel de 3 a 0.3 metros escena satelital PlanetScope . . . 34
12. Modelmaker falsa pancromática . . . 35
13. Ecuación falsa pancromática . . . 35
14. Layer Stack . . . 36
15. Fusión de imágenes por Método de Brovey . . . 36
16. Fusión de imágenes por Método de Multiplicación . . . 37
17. Cálculo de índices espectrales . . . 38
18. Panel de segmentación . . . 39
19. Slice panel . . . 40
20. Extracción por atributos del raster . . . 41
21. Mapa Topográfico Urbano . . . 45
22. Área de Estudio . . . 46
23. Escena satelital WorldView 3 . . . 47

24. Escena satelital PlanetScope . . . 47
25. Metadata escena satelital WorldView 3 . . . 48
26. Metadata escena Satelital PlanetScope . . . 49
27. Verificación del cambio de sistema de coordenadas Escena Satelital Worldview 3 50
28. Recorte escena satelital WorldView 3 . . . 50
29. Recorte escena satelital PlanetScope . . . 51
30. Escena satelital PlanetScope 16 bits . . . 51
31. Escena satelital PlanetScope 8 bits . . . 51
32. Escena satelital PlanetScope Resampleada . . . 52
33. Verificación escena Satelital PlanetScope Resampleada . . . 53
34. Empalme entre píxeles . . . 53
35. Escena Falsa Pancromática . . . 54
36. Escena RGB Worldview - NIR PlanetScope . . . 55
37. Fusión de imágenes por Método de Brovey (Menor detalle) . . . 55
38. Fusión de imágenes por Método de Brovey (Mayor detalle) . . . 55
39. Fusión de imágenes por Método de Multiplicación (Menor detalle) . . . 56
40. Fusión de imágenes por Método de Multiplicación (Mayor detalle) . . . 56
41. NIR ORIGINAL . . . 57
42. NIR Brovey . . . 57
43. NIR Multiplicación . . . 57
44. NIR ORIGINAL . . . 57
45. NIR Brovey . . . 57
46. NIR Multiplicación . . . 57
47. Lut Value ORIGINAL . . . 58
48. Lut Value Brovey . . . 58
49. Lut Value Multiplicación . . . 58
50. EG NDVI . . . 59
51. EG DVI . . . 59
52. EG SAVI . . . 59
53. EG MSAVI2 . . . 60
54. EG BI2 . . . 60
55. NDVI . . . 60
56. DVI . . . 60
57. SAVI . . . 60
58. MSAVI2 . . . 60
59. BI2 . . . 60
60. Segmentación NDVI . . . 62
61. Segmentación DVI . . . 62
62. Segmentación SAVI . . . 62
63. Segmentación MSAVI2 . . . 62
64. Segmentación BI2 . . . 62
65. Reclasificación NDVI . . . 63
66. Reclasificación DVI . . . 63
67. Reclasificación SAVI . . . 63
68. Reclasificación MSAVI2 . . . 63

69. Reclasificación BI2 63
70. Polígonos NDVI 63
71. Polígonos DVI 63
72. Polígonos SAVI 63
73. Polígonos MSAVI2 64
74. Polígonos BI2 64
75. Fusión RGB NIR 65
76. Polígonos finales 65
77. Polígonos Constructivos 65
78. Escena RGB WorldView3 66
79. Clasificación supervisada 66
80. Nomenclatura provisional 68
81. Verificación en campo 69

Resumen:

El procesamiento digital de imágenes es una herramienta óptima y eficaz a la hora de llevar a cabo procesos de adquisición de información, es así como, en el presente documento mediante análisis espacial, a través de: sensores remotos, fusión de imágenes (Método de Brovey y Multiplicación) y manejo de índices espectrales (NDVI, SAVI, DVI, MSAVI2 y BI2) para los satélites WorldView 3 y PlanetScope; se adquiere información de primer nivel referente al proceso de formación catastral; enfocada en la detección primaria de construcciones ubicadas en dos asentamientos informales en el norte del municipio de Sabana de Torres del departamento de Santander, Colombia. Lo anterior, surge de la necesidad de optimizar los procesos catastrales a través de métodos indirectos, todo bajo la luz del catastro multipropósito, es así como al momento de iniciar el proceso de formación catastral este no partirá desde cero sino contara con una base de información, conformada por: Salidas Ráster y Vector, lo cual hará que el proceso en campo se realice de manera más eficaz y óptima.

Palabras clave: Procesamiento digital de imágenes; Fusión de imágenes, Índices espectrales; Formación catastral, Asentamientos informales.

Abstract:

Digital image processing is an optimal and efficient tool when carrying out information acquisition processes, thus, in this document by means of spatial analysis, through: remote sensing, image fusion (Brovey and Multiplication Method) and management of spectral indices (NDVI, SAVI, DVI, MSAVI2 and BI2) for WorldView 3 and PlanetScope satellites; first level information is acquired regarding the cadastral formation process; focused on the primary detection of constructions located in two informal settlements in the north of the municipality of Sabana de Torres in the department of Santander, Colombia. The above, arises from the need to optimize the cadastral processes through indirect methods, all under the light of the multipurpose cadastre, so at the time of initiating the cadastral training process this will not start from scratch but will have an information base, consisting of: Raster and Vector outputs, which will make the field process more efficient and optimal.

Keywords: Digital image processing; Image Fusion, Spectral Indices; Cadastral formation, Informal settlements.

1. Introducción

Los asentamientos informales son un fenómeno que usualmente está relacionado con "aglomeraciones de viviendas, producto de la ocupación o invasión de tierras fiscales o privadas, cuya construcción fue financiada por sus ocupantes o sus antecesores por el sistema de autoconstrucción" (Tituaña, 2018); dicho sistema autoconstructivo es el que genera mayor dinámica a nivel de expansión territorial, causando así problemas de planeación y volviéndose todo un reto, que en muchos casos termina en la legalización de dichas zonas.

Es por esto que, en el presente documento se propone un análisis metodológico y procedimental, el cual, tiene como objetivo generar información línea base de asentamientos informales desde métodos indirectos, como apoyo al proceso de formación catastral; esta información surge a partir del procesamiento digital de imágenes, específicamente de la fusión de escenas satelitales y la aplicación de índices espectrales, encontrando justificación en la implementación que actualmente se está dando del catastro multipropósito, y también en los altos índices de informalidad en la tierra que tiene Colombia.

Asimismo, en el marco procedimental se vincula la revisión de las escenas sintéticas obtenidas de la fusión de imágenes satelitales por los diferentes métodos; esta revisión se efectúa bajo los índices calidad de imágenes mencionados por (Vaiopoulos, 2011). Posteriormente se validan las construcciones obtenidas, contrarrestándolas con el método tradicional de clasificación de imágenes y con una verificación en campo, poniendo en evidencia la viabilidad y la eficacia de la metodología aquí presentada.

A razón de lo anterior se busca caracterizar y modelar dos asentamientos informales ubicados en el norte del municipio de Sabana de Torres, Santander, Centro-Norte de Colombia, en la cordillera de los Andes, obteniendo como resultados; representaciones visuales, capas vector y ráster, que cuentan como propuesta de información primaria línea base de las construcciones correspondientes al presente caso de estudio.

Finalmente, se resalta el hecho de que este marco procedimental permite que se puedan llevar a cabo análisis territoriales con fines catastrales de zonas que no cuenten con amplia información satelital, ya que, se implementa la fusión de imágenes, permitiendo que se pueda combinar información de diferentes medios para obtener en conjunto información con mayor riqueza espacial y espectral.

2. Planteamiento del problema

La aglomeración de viviendas en espacios no destinados para la urbanización se constituyen en procesos de ocupación informal, derivando en prácticas de sistemas autoconstructivos; esto es una problemática a la cual se ven enfrentadas las entidades territoriales en Colombia cómo es el caso del municipio de Sabana de Torres del departamento de Santander, así como en otras partes del mundo. Dichos asentamientos informales darán como consecuencia problemáticas en la planificación territorial, debido a que se fuerzan las zonas de expansión urbanas, con el objetivo de solventar dificultades como lo son el equipamiento de servicios públicos, garantizar una vivienda digna para las personas de dichos espacios y dar condiciones óptimas para la urbanización, vinculando dotacionales y equipamientos colectivos.

Sumado a la problemática anterior, tenemos la falta de información de dichos procesos autoconstructivos o asentamientos informales, esto no permite que la entidad territorial correspondiente pueda actuar o formular una política pública eficaz, la cual solvente este fenómeno, ya que, no cuenta con una correcta caracterización o punto de partida de manera diagnóstica de estos espacios, lo cual dificulta la ejecución de los procesos catastrales de formación, actualización y conservación catastral.

Aunque al 30 de junio de 2022, según cifras del IGAC, el país llegó a una actualización catastral equivalente al 40.31 %, más de 45.9 millones de hectáreas (DNP, 2022), seguimos en un déficit de información respecto a los procesos catastrales en la mayoría de nuestro territorio,ya que, según cifras presentadas en el periódico de la Universidad Nacional de Colombia; el 28 % del país no tiene ningún tipo de catastro (UNAL, 2022). Algunos de los factores que ayudan a este pésimo estado del Catastro en Colombia están relacionados con la falta de información satelital robusta que permita adelantar estos procesos catastrales en zonas de difícil acceso. Por otro lado, al tratar de implementar tecnologías externas que han sido exitosas en otros países, se cae en la trampa de no tener personal capacitado, lo cual retrasa los tiempos de ejecución y aumenta el presupuesto. Igualmente , cuando se logra la captura de la información, suele volverse tediosa su administración,por lo cual, no hay congruencia entre las diferentes entidades que manejan esta información y la interrelación del catastro se pierde, causando así un retraso en la cadena consecutiva de los procesos catastrales (Formación, Actualización y Conservación), es decir, que si se empieza con problemas o simplemente no existen los datos de Formación Catastral , los otros procesos no se pueden realizar. Por todo lo anterior, es claro que existe un problema a la hora de recopilar información que facilite y haga más eficientes los procesos catastrales, lo cual, amerita un proceso de indagación académica sobre métodos indirectos, con el fin, de aplicar o desarrollar diferentes metodologías que optimicen dichos procesos y en este caso específico caracterizar los asentamientos informales. Es aquí donde surge la pregunta: ¿Qué metodología permitirá obtener a la luz del catastro multipropósito información de asentamientos informales con el fin de facilitar u optimizar los procesos catastrales?.

3. Justificación

El presente trabajo se justifica en el catastro multipropósito en su implementación desde un enfoque donde se debe levantar la información catastral de la tierra independientemente de su situación jurídica, es por ello que se busca investigar nuevas metodologías que a partir de métodos indirectos de adquisión de información ayuden a este proceso, metodologías que puedan ser implementadas por los mismos municipios o por operadores catastrales, ya que ahora la responsabilidad no recae simplemente en el Instituto Geográfico Agustín Codazzi.

Para (Escobar y Cárdenas, 2018) el catastro multipropósito es un paso fundamental en el desarrollo del Punto 1 del Acuerdo de Paz, que busca contribuir al cierre de las brechas entre el campo y la ciudad. Entre otras reformas, este punto plantea un banco de tierras y un catastro multipropósito con el objeto de “crear condiciones de bienestar y buen vivir para la población rural, integrar las regiones y contribuir a erradicar la pobreza y promover la igualdad”. El Acuerdo incluye el compromiso de llevar a cabo un plan masivo de formalización de la pequeña y mediana propiedad, lo que requiere tener certeza sobre la titularidad y, en general, la información del territorio. La necesidad de un énfasis en formación y gestión catastral es

quizá lo que ha motivado la propuesta de un nuevo estatuto catastral. En este mismo sentido (Matic y Moreno, 2017) resaltan el hecho de que el acuerdo final define una serie de acciones para concretar los resultados esperados en materia catastral, dentro de ellos la Formación y actualización en un plazo de siete años, con vinculación del registro de inmuebles rurales y ejecución dentro de la autonomía municipal, con resultados tempranos en zonas priorizadas, en desarrollo de los principios de priorización, bienestar y buen vivir, que apunten además a la seguridad jurídica y social de la propiedad, especialmente de la pequeña y mediana propiedad, en beneficio de la producción alimentaria y del equilibrio ambiental.

Como se puede evidenciar, el catastro multipropósito y el acuerdo de paz van de la mano, es por ello que se hace necesario conocer nuestro territorio y esto se realiza mediante la ejecución los procesos catastrales, entre ellos el primero es la formación catastral , la cual termina siendo la base fundamental para el desarrollo tanto de la actualización como de la conservación catastral, por tal razón la presente investigación se centra en desarrollar una metodología que permita mediante métodos indirectos adquirir información que facilite el proceso en campo y el levantamiento de información a la hora de formar catastralmente en nuestro caso asentamientos informales.

4. Objetivos

4.1. Objetivo general

Desarollar una metodología con enfoque multipropósito basada en procesamiento digital de imágenes, cuyo fin es adquirir información base a nivel predial para el proceso de formación catastral de asentamientos informales.

4.2. Objetivos específicos

1. Definir la zona de estudio y los insumos requeridos para la implementación de la metodología, cuyo fin es adquirir información a nivel predial de los asentamientos informales ubicados en el norte del municipio de Sabana de Torres, Santander.

2. Implementar la metodología planteada, realizando procesamiento digital de imágenes, fusión de imágenes, aplicación de índices espectrales y demás análisis que permitan modelar los asentamientos,mediante representaciones visuales, capas vector y ráster, con la finalidad de proponer información base para el proceso de formación catastral.

3. Validar que la información obtenida a partir de la implementación metodológica se contrasta con los métodos convencionales de clasificación y con lo encontrado en campo.

5. Marco de Referencia

El marco de referencia desarrollado a continuación estará conformado por dos secciones, las cuales son: Marco Teórico Conceptual, Estado del Arte y Antecedentes , con ellas se busca

que el lector adquiera todos los conocimientos previos necesarios para comprender el desarrollo metodológico.

5.1. Marco Teórico Conceptual

En esta primer sección se contemplan todos los conceptos que se abarcan a lo largo del desarrollo del documento, se presentan: definiciones, ilustraciones, formulas o ecuaciones con el fin facilitar la comprensión de los procedimientos realizados.

5.1.1. Asentamientos informales

Los asentamientos informales son una forma común, y frecuentemente preponderante, de emprendimientos residenciales en la mayoría de los países latinoamericanos. Dichos emprendimientos son el resultado, en parte, de una ocupación ilegal o subdivisión no permitida de los suelos y, en parte, de prácticas de exclusión que han contribuido a la existencia de condiciones históricas de desigualdad en cuanto a crecimiento económico y distribución de la riqueza. Estos asentamientos normalmente son establecidos por emprendedores ilegales o nuevos residentes que ocupan suelos públicos, comunales o privados. Por lo general demarcan lotes y comienzan a construir viviendas rudimentarias, donde los servicios públicos como: la pavimentación, el alumbrado de calles, el agua y el alcantarillado son inexistentes, pero con el paso del tiempo las edificaciones se expanden, los materiales provisionales se reemplazan con otros más duraderos y el mismo gobierno empieza a abastecer los servicios públicos. Por lo cual, los asentamientos frecuentemente se reconocen legalmente como parte del desarrollo normal de la ciudad, ya sea por medidas oficiales concretas y puntuales o por la adquisición de derechos a lo largo del tiempo (Fernandes, 2011).

Se resalta el hecho de que estos asentamientos informales o ilegales pueden ser “consecuencia de eventos cómo el desplazamiento forzado, los procesos migratorios campo-ciudad e incluso los ocasionados por los desastres naturales” (Uribe, 2011). Todo esto, trae dinámicas difíciles para las ciudades que se enfrentan a una demanda de vivienda que por lo general no pueden satisfacer, llegando a un punto donde la solución más factible es la legalización de estos asentamientos.

5.1.2. Catastro multipropósito

El Catastro Multipropósito es un sistema de información que registra datos actualizados de la tierra, basado en predios formales e informales. La información obtenida contiene especificaciones sobre derechos, responsabilidades, restricciones, descripciones geométricas, valores y otros datos; y registra intereses sobre los predios, en términos de ocupación, valor, uso y urbanización (IGAC, 2022a). A continuación en la Figura 1, se puede evidenciar las nueve características del Catastro multipropósito en una visión de 10 años:



Figura 1: Catastro multipropósito

Para (Molina, 2015) el catastro multipropósito sostenible es la herramienta fundamental para consolidar al país como un territorio articulado, integrado y cohesionado en los ámbitos físico, económico y social, dentro de su entorno geográfico natural. Ello repercutirá en un desarrollo social equilibrado que mejore la calidad de vida de sus ciudadanos, estimulado por una mejor y más eficaz gestión de los recursos públicos. Pero, aun considerándolo una meta en muchas iniciativas, el catastro multipropósito sostenible debe contemplarse como un paso previo para lograr una verdadera infraestructura territorial, dinámica, ágil, confiable y especialmente, útil.

Por otra parte, en el caso de las relaciones informales o ilegales de tenencia y propiedad, el propósito es que la información que recoja el catastro multipropósito e incorpore en su sistema sea utilizada por las entidades relacionadas con la función de formalización, restitución y distribución de tierras; quienes calificarían la relación, definirían la ruta y adelantarían o promoverían los procesos administrativos o judiciales necesarios, que finalmente se reflejen en el registro público de la propiedad, en razón de la seguridad jurídica del derecho de propiedad y la materialización de la reforma rural integral, en lo que refiere, entre otras, a la redistribución equitativa y acceso efectivo a la tierra (Matic y Moreno, 2017).

5.1.3. Proceso de formación catastral

Según (Pinzón y Fonti, 2007) la formación catastral tiene como propósito levantar información tanto física, como jurídica y económica de los predios por primera vez. Las principales actividades relacionadas con la formación del catastro para la obtención de la información física, jurídica y económica de cada predio están asociadas a:

- Demarcación de los linderos municipales.

- Delimitación de los perímetros urbanos conforme a los acuerdos promulgados por los concejos municipales.
- Adquisición de la nomenclatura de todas las propiedades pertinentes, carreteras, y asentamientos urbanos.
- Identificación y definición de los linderos de los predios, mediante la verificación de documentos existentes, inspecciones catastrales y entrevistas con dueños y poseedores.
- Identificación de dueños o poseedores y definición gráfica de construcciones en los predios.
- Localización física de los predios en la carta catastral correspondiente.
- Determinación de las zonas homogéneas físicas y geoeconómicas para establecer el avalúo catastral.
- Asignación de un número predial único.

Desde el punto de vista teórico, el proceso descrito anteriormente se debería adelantar de manera conjunta, tanto para las zonas urbanas como para las rurales, pero en la realidad la formación catastral en zonas rurales está bastante rezagada.

5.1.4. Teledetección

Para (Perez y Muñoz, 2006) la Teledetección se entiende como cualquier procedimiento o técnica de adquisición de información sin tener contacto directo con ella. Sin embargo, de un modo más restringido, y en el ámbito de las ciencias de la Tierra, la Teledetección es entendida como una Técnica que tiene por objeto la captura, tratamiento y análisis de imágenes digitales tomadas desde satélites artificiales. Por otra parte, a menudo se emplean definiciones más restrictivas que limitan el término al registro de la radiación electromagnética. [1].

Estos mismos autores definen los componentes de un Sistema de Teledetección: El primero de estos componentes es una fuente generadora de radiación electromagnética, el sol. La energía originada por esta fuente se refleja en las distintas cubiertas terrestres, y tras atravesar la atmósfera, es recogida por sensores óptico-electrónicos situados a bordo de vehículos espaciales. Dicha información es transmitida a Tierra, como una señal digital, en forma de matriz numérica. En los sistemas de recepción se lleva a cabo un primer tratamiento de la imagen, gracias al cual son depurados algunos errores de índole geométrico o radiométrico antes de ser distribuida a los usuarios. Por último, la imagen en formato analógico o digital es analizada por los usuarios. Estos realizan procesos de tratamiento visual o digital, tras los cuales se obtienen unos nuevos datos que pueden cobrar forma de mapas temáticos o de tablas estadísticas que recogen el comportamiento de una determinada variable espacial. La representación esquemática de este proceso se puede visualizar en la Figura 2:

[1] Para (Sabins, 1978) la teledetección es el registro de información de un objeto sin entrar en contacto material con él en las regiones del ultravioleta, visible, infrarrojo y microondas, por medio de instrumentos como escáners y cámaras localizadas en plataformas móviles (un avión o satélite) y el análisis de la información adquirida por medio de técnicas de fotointerpretación, interpretación de imágenes y procesado de las mismas"

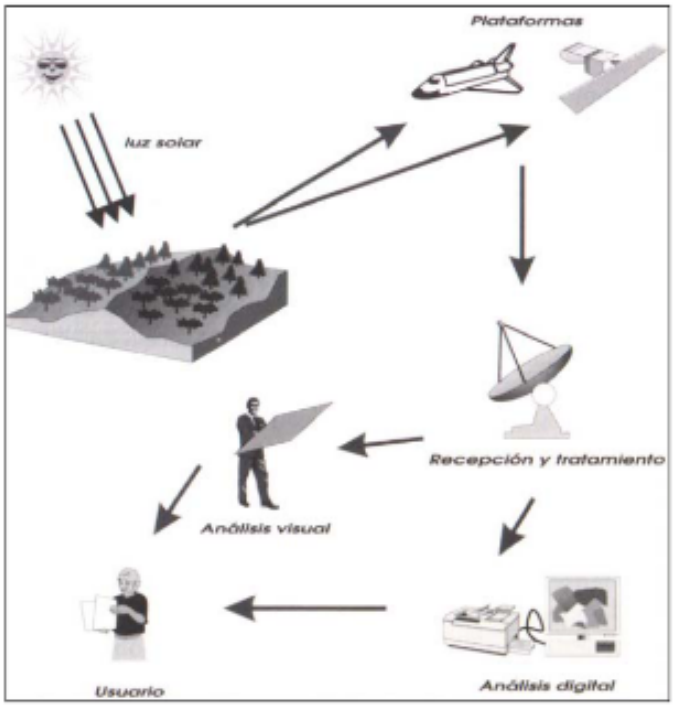


Figura 2: Componentes de un sistema de teledetección

5.1.5. Sensores

- WorldView-3: Fue lanzado el 13 de agosto de 2014, es el último de una constelación de satélites comerciales de imágenes de la Tierra de alta resolución espacial desarrollados por DigitalGlobe Inc. WorldView-1 (WV-1) se lanzó en 2007 con un sistema de imágenes pancromático (PAN) con una resolución espacial de 0,5 m. WorldView-2 (WV-2), lanzado en 2009, proporciona datos PAN de alta resolución espacial con un tamaño de píxel de 0,46 m, además de imágenes visibles y de infrarrojo cercano (VNIR) (0,4 a 1.04 micrómetros) a una resolución espacial de 1,85 m en ocho bandas multiespectrales. WV-3 es una mejora incremental de los sensores anteriores, que ofrece esencialmente las mismas capacidades multiespectrales PAN y VNIR (aunque con una resolución espacial de 0,31 y 1,24 m, respectivamente). Estos se complementan en WV-3 con ocho bandas adicionales de infrarrojos de onda corta (SWIR) (denominadas aquí bandas S1 a S8) que van desde aproximadamente 1,2 a 2.33 micrómetros con una resolución espacial de 3,7 m (aunque actualmente solo se publica con una resolución espacial de 7,5 m). El sistema también incluye 12 bandas adicionales "Nubes, Aerosoles, Vapor de agua, Hielo y Nieve" (CAVIS) con una resolución de 30 m para compensación atmosférica. Combinados, estos le dan al WV-3 la distinción de tener un total de 29 bandas espectrales, que abarcan el rango VNIR-SWIR, y ser el único satélite comercial de imágenes de la Tierra multiespectral SWIR de alta resolución espacial actualmente en órbita (Kruse, Baugh, y Perry, 2015). WorldView-3 fue la primera misión en transportar un sensor satelital comercial de alta resolución, súper espectral y de carga útil múltiple. WorldView-3 es capaz de recolectar hasta 680.000 km^2 por día, a continuación en el Cuadro 1 se muestran algunos de los parámetros de la misión definidos por la (ESA, 2022b) :

Altitud de órbita	617 kilometros
Tipo de órbita	Sincrónico al sol
Período de órbita	97 minutos
Hora del cruce del ecuador	10:30 nodo descendente

Cuadro 1: Parámetros de la misión WorldView-3

(Geospatial, 2022) define algunas características importantes que son:

- Resolución : 0.3 m pancromática, 1.5 m multiespectral, 7.5 m SWIR
- Bandas: Pancromática; 8 bandas multiespectrales (rojo, verde, azul, borde rojo, costero, amarillo y 2 NIR), 8 bandas de infrarrojos de onda corta (SWIR), bandas CAVIS
- Proyección: UTM, Lat/Long, State Plane
- Datum: NAD 83, WGS 84
- Formato: GeoTIFF, JPEG
- Fechas: 2014 – presente

- PlanetScope: Brinda información oportuna sobre cada ubicación en la Tierra, recopila constantemente nuevas imágenes todos los días y llena los vacíos de datos críticos. Proporciona una comprensión más completa y sostenida de los acontecimientos en todo el mundo (PlanetScope, 2022). La constelación PlanetScope tiene más de 130 satélites DOVE, a continuación en el Cuadro 2 se muestran algunos de los parámetros de la misión definidos por la (ESA, 2022a):

Altitud de órbita	475 - 525 kilometros
Tipo de órbita	Sincrónico al sol
Inclinación de la órbita	98°
Ciclo de repetición	Diariamente
Hora del cruce del ecuador	9:30 - 11:30 am (hora solar local)

Cuadro 2: Parámetros de la misión PlanetScope

Y algunos instrumentos PlanetScope son:

- Bandas espectrales: Azul costero: 431 - 452 nm, Azul: 465 – 515 nm, Verde I: 513 - 549 nm, Verde: 547 – 583 nm, Amarillo: 600 - 620 nm, Rojo: 650 – 680 nanómetro, Borde rojo: 697 - 713 nm, NIR: 845 – 885nm.
- Capacidad de captura de imágenes: 200 millones de kilómetros cuadrados /día
- Franja de imagen máxima por órbita: 20.000 kilómetros cuadrados

Siguiendo con el tema de los sensores a ellos se les asocia cuatro tipos de resoluciones, a lo largo del desarrollo de la metodología la resolución espacial y la resolución espectral, se tratan con mayor importancia y frecuencia. (Tristán, Wainschenker, y Doorn, 2008) define estas

cuatro resoluciones de la siguiente manera: La resolución espacial es la capacidad del sistema para distinguir el objeto más pequeño en una imagen, y depende de las características de la altura de la órbita, la velocidad de detección y el número y miniaturización de los detectores. Mientras que la resolución espectral es la capacidad del sensor para discriminar la radiancia detectada en distintas longitudes de onda del espectro electromagnético y depende del número de bandas que el sensor puede capturar y su ancho espectral. En general, cuanto mayor sea el número de bandas que proporciona, más útil será el sensor, ya que algunas coberturas requieren estudios multiespectrales.

Por otra parte, las otras dos resoluciones son: La resolución radiométrica que es la capacidad del sensor para discriminar niveles o intensidades de radiación espectral [2]. Finalmente, la resolución temporal es la capacidad del sistema para discriminar los cambios temporales sufridos por la superficie en estudio, es decir, que hace referencia a la periodicidad con la que el sensor adquiere nuevas imágenes de un mismo punto de la superficie terrestre.

5.1.6. Imágenes satelitales

Se debe empezar diciendo que el píxel es un elemento discreto que conforma una imagen digital, estos elementos bidimensionales se constituyen como los menores elementos no divisibles de la imagen (Cervantes, 2014).

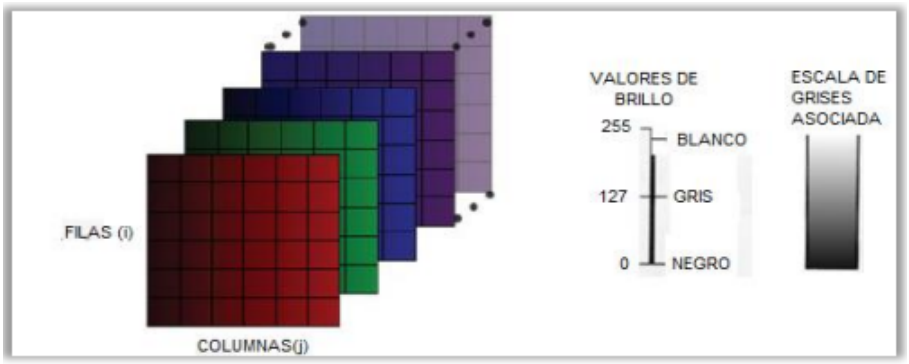


Figura 3: Píxeles

En la figura anterior (Figura 3) se ve de forma esquemática cómo una imagen digital está compuesta de pixeles ubicados en la intersección de cada fila i y columna j en cada una de las k bandas correspondientes a una escena. Asociado a cada píxel existe un número (Número Digital, ND) que mide la radiancia promedio o brillo correspondiente al área de escena abarcada por dicho píxel.[3]

[2]En sistemas analógicos como la fotografía, la resolución radiométrica está determinada por el número de niveles de gris disponibles. En un sistema óptico-electrónico, la radiación incidente en un sensor es registrada en una matriz por un conjunto de celdas, cada una reportando un nivel digital (ND) proporcional a la energía electromagnética recibida. Estos datos se obtienen mediante un conversor de analógico a digital en la plataforma. Algunos sensores pueden distinguir 128 niveles, mientras que otros pueden alcanzar 1024 niveles diferentes.

[3]O sea que para cada píxel en una escena que consta de k bandas espectrales habrá asociados k niveles de grises. Estos definen un espacio espectral k dimensional en el que cada píxel es representado por un vector que constituye su firma espectral y que permitirá, a través de operaciones de clasificación basadas en algoritmos matemático-estadísticos, asignar dicho píxel a clases temáticas definidas.

Teniendo claro lo anterior, para (López, 2018) la imagen satelital se puede definir como una matriz digital de puntos (igual a una fotografía digital) capturada por un sensor montado a bordo de un satélite que órbita alrededor de la tierra. A medida que el satélite avanza en su órbita "barre" la superficie con un conjunto de detectores que registran la energía reflejada. Las características de estas imágenes varían principalmente de acuerdo al tipo de sensor que se usa para su adquisición y de la distancia a la cual se encuentra la plataforma en el espacio.

Las imágenes de satélite, se encuentran en formato ráster, el cual consiste en una matriz de miles de pixeles, en donde cada píxel tiene un valor digital o de reflectancia; ejemplificando, si la resolución de la imagen es de 30 metros, cada pixel muestra un área en la superficie terrestre de 30x30 metros (900 m^2), con esto, la firma espectral o reflectancia de todos los objetos existentes en una superficie de 900 m^2 será promediada para darle su valor digital al píxel. La información contenida en cada píxel está en formato digital, normalmente de 8 bit por lo que cada píxel de la imagen puede tener 256 posibles valores o colores distintos, en donde el 0 corresponde al color negro, 255 al color blanco y se encuentran 254 distintos tonos de gris intermedios (Cervantes, 2014). Este mismo autor define dos tipos de imágenes:

- Imágenes pancromáticas: Son imágenes que se captan mediante un sensor digital que mide la reflectancia de energía en una amplia parte del espectro electromagnético (con frecuencia, tales porciones del espectro reciben el nombre de bandas).

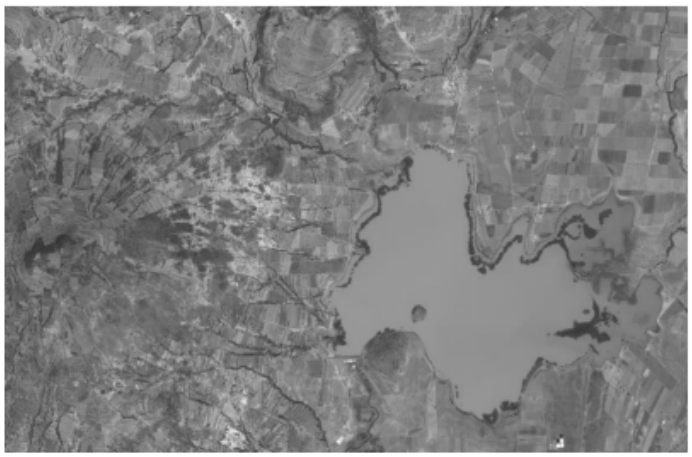


Figura 4: Imagen pancromática

  Para los sensores pancromáticos más modernos, esta única banda suele abarcar la parte visible y de infrarrojo cercano del espectro, por lo tanto, los datos pancromáticos se representan por medio de imágenes en escala de grises como se puede evidenciar en la figura anterior (Figura 4).

- Imágenes multiespectrales: Se captan mediante un sensor digital que mide la reflectancia en muchas bandas. Por ejemplo, un conjunto de detectores puede medir energía roja reflejada dentro de la parte visible del espectro mientras que otro conjunto mide la energía del infrarrojo cercano. Es posible incluso que dos series de detectores midan la energía en dos partes diferentes de la misma longitud de onda. Estos distintos valores de reflectancia

se combinan para crear imágenes de color como se muestra en la Figura 5. Los satélites de teledetección multiespectrales de hoy en día miden la reflectancia simultáneamente en un número de bandas distintas que pueden ir de tres a catorce.



Figura 5: Imagen multiespectral

5.1.7. Procesamiento digital de imágenes

Para (Cuevas, Zaldívar, y Pérez, 2016) el procesamiento de información es un tema fundamental en ciencia y tecnología, algo particularmente notorio en el ámbito de las ingenierías, ya que la concepción, diseño, implementación y operación de procesos requiere generar información para la toma de decisiones a partir de grandes volúmenes de datos. El análisis de procesos y sistemas se apoya, cada vez más, en datos de medición adquiridos a través de sensores altamente sofisticados, sobre las diferentes variables que intervienen en estos procesos complejos. El procesamiento digital de imágenes se ha consolidado como un campo fascinante que forma parte de la vida diaria. En sus inicios, su uso estuvo restringido a campus de investigación básica de ciencias de la computación, matemáticas y astronomía, y a aplicaciones militares. Sin embargo, la que en ese momento era considerada como una actividad restringida, sofisticada, complicada y costosa, se ha convertido en una disciplina en sí misma, en buena parte gracias al avance tecnológico que permite disponer de hardware y software, cada día más potente y económico. Hoy es una herramienta indispensable en aplicaciones de control industrial, control automático de la calidad, robótica, sensórica, telecomunicaciones, medicina, geociencias, ciencias ambientales, etc.

Adicionalmente, (Salvatierra, 2004) puntualiza el procesamiento como un conjunto bien definido y clasificado de realces, que dejan lista la imagen para una descripción matemática de las regiones que la componen. Las regiones están formadas a su vez por patrones espaciales y espectrales, de tal forma que el reconocer estos patrones por medio de modelos matemáticos, implica la descripción de las regiones que forman una imagen. En otras palabras, reconocer un patrón requiere primero de su manifestación evidente por medio de un procesamiento bien definido a la imagen y seguido de una descripción cualitativa de sus propiedades morfológicas y estadísticas.

Cabe resaltar que, las imágenes satelitales se han vuelto una gran fuente de datos para mapear y monitorear el uso y cobertura de la tierra, ya que, proporcionan información actualizada y una visión general de las características del paisaje y los cambios en las zonas urbanas (Rasul y cols., 2018). En el mismo sentido, se destaca la importancia de desarrollar técnicas avanzadas de "procesamiento de imágenes satelitales que puedan ser utilizadas para obtener información exhaustiva, precisa, periódica y de fácil actualización sobre los espacios urbanos"(Linares y Tisnés, 2011).

5.1.8. Fusión de imágenes

Para lograr un análisis y clasificación de la cobertura del suelo, se necesitan imágenes con alta resolución espacial y espectral, lo cual, se consigue mediante fusiones de escenas satelitales(Audícana, Otazu, Fors, y Alvarez, 2006).

La fusión de una imagen pancromática (pan) con una alta resolución espacial y baja espectral e imágenes multiespectrales (MS) con una baja resolución espacial y alta espectral es un tema importante en muchas aplicaciones de teledetección que requieren alta resolución espacial y espectral (Choi, 2006). Loa métodos de fusión de imágenes que se utilizaran en este documento son: El Método de Brovey y El Método de Multiplicación, el primero corresponde a una relación técnica de fusión que conserva las contribuciones espectrales relativas de cada píxel, pero reemplaza su brillo general por la imagen pancromática de alta resolución(Tu, Lee, Chang, y Huang, 2005). Es decir, que los datos multiespectrales resultantes son "un producto que combina sinérgicamente las mejores características de cada uno de sus componentes" (Tu, Su, Shyu, y Huang, 2001). Y el segundo método para (González y Bueno, 2017) consiste en realizar un algoritmo simple de multiplicación para así incluir la información de la imagen pancromática con mayor resolución espacial a la imagen multiespectral que posee riqueza espectral. Mediante esta operación, las características espectrales de las bandas multiespectrales iniciales se modifican aproximándose a las de la imagen de alta resolución, en consecuencia, se genera un porcentaje de pérdida, en relación con la información espectral de la imagen original. Con el fin de posibilitar operaciones píxel a píxel, es necesario realizar un proceso de remuestreo llevando la imagen multiespectral al mismo número de pixeles de la imagen pancromática.

Finalmente, de la fusión se obtiene una alta resolución que sirve "para mejorar técnicas de análisis de imágenes existentes, como la clasificación de la cobertura terrestre"(Munechika, Warnick, Salvaggio, y Schott, 1993).Es de resaltar que el proceso de fusión de imágenes se efectúe sin modificar mayoritariamente la información espectral de la imagen multiespectral inicial, definiendo así su calidad"(Audícana, Otazu, Fors, y Seco, 2005).

Para (Gordo y Robles, 2010) La fusión de imágenes que interesa en la interpretación de entornos urbanos es aquella en la que se une una imagen pancromática (PAN) y otra multiespectral (MS). La PAN aporta una gran resolución espacial pero sólo en color gris mientras que la MS aporta el color producido por varias bandas (normalmente las tres bandas fundamentales: rojo, verde y azul). El resultado es una imagen fusionada con la máxima resolución espacial y espectral.

Es importante recalcar que para generar la fusión de datos, se debe usar un método de remuestreo para ayudar a interpolar los píxeles originales a las nuevas posiciones resultantes, en nuestro caso utilizaremos el método de vecino más cercano, el cual, consiste en utilizar un

algoritmo que asigna a cada píxel de la imagen rectificada un CD correspondiente al píxel de la imagen rectificada cuyo centro está más cerca del centro de la imagen rectificada. Este proceso no significa cambiar el CD de la imagen original, solo moverla a otra ubicación, es decir, que realiza una asignación de vecino más cercano y es el método de interpolación más rápido. (Sobrino, 2001).

5.1.9. Índices de calidad de imágenes

Para (Vaiopoulos, 2011) las imágenes procesadas a menudo deben correlacionarse con la imagen original para garantizar que la imagen resultante cumpla su propósito. Aparte del examen visual, que es obligatorio, los índices de calidad de imagen (como el coeficiente de correlación, la entropía y otros) son muy útiles a la hora de decidir qué imagen procesada es la más satisfactoria. Es por ello que este mismo autor definió un programa (script) escrito, en código Matlab, que calcula automáticamente algunos índices que se utilizan para la comparación de imágenes y la evaluación de la calidad, el propósito inicial del programa es comparar fusiones de imágenes, por esta razón a continuación se definen los 4 índices que se ejecutaran el Matlab con el fin de evaluar las fusiones realizadas:

- BIAS (Sesgo): Se basa en la división de los valores medios de la imagen procesada y la original. El valor de sesgo ideal teórico es 0. Un pequeño valor positivo o negativo de sesgo significa una gran similitud entre x e y. La ecuación para aplicar este índice es:

$$BIAS = 1 - \frac{\bar{y}}{\bar{x}} \tag{1}$$

- Coeficiente de Correlación (CC): Define la correlación entre la imagen original y la procesada, se considera como un índice confiable y se usa comúnmente. Tiene un rango dinámico de [-1 1]. El valor 0 indica absolutamente ninguna correlación entre los datos x y los datos y, mientras que el valor 1 indica que x = y. Valor -1, significa que x es exactamente lo contrario de y, o x = -y. La ecuación para aplicar este índice es:

$$CC = \frac{\sigma_{xy}}{\sigma_x \sigma_y} \tag{2}$$

- Entropía de la imagen (E): Refleja la cantidad de información incluida en una determinada imagen. La entropía requiere un análisis de histograma: p es el porcentaje de píxeles, cuyo valor cae en una determinada clase de contenedor, mientras que bc es el número total de clases de contenedor. La ecuación para aplicar este índice es::

$$E = -\sum_{i=1}^{bc} p * log_2(p) \tag{3}$$

- Error cuadrático medio (RMSE): Quizás uno de los índices más populares y comúnmente utilizados. Es la raíz de la diferencia al cuadrado, de dos conjuntos de datos (x,y), dividida por el número de elementos (o píxeles),n:

$$RMSE = 1 - \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i - y_i)^2}{n}} \tag{4}$$

5.1.10. Índices espectrales

Para (Muñoz, 2013) los índices son un conjunto de operaciones algebraicas efectuadas sobre los valores numéricos de los pixeles, usando dos o más bandas pertenecientes a la misma escena. Adicionalmente (Buzzi, Rueter, y Ghermandi, 2017) expresan que son una herramienta utilizada en grandes extensiones territoriales para obtener información rápida y clasifican los índices de vegetación en cuatro grupos: Índices de vegetación simples (DVI, NDVI,RVI), Índices de vegetación desarrollados para ajustarse a la influencia del suelo desnudo (SAVI, MSAVI2), Índices de vegetación que combinan correcciones para disminuir la influencia del suelo desnudo o los efectos atmosféricos (EVI, EVI2) e Índices de vegetación estimados para incrementar la relación lineal entre el índice y los parámetros biofísicos (GNDVI).

A partir de lo anterior, para realizar la caracterización de las construcciones se plantea la aplicación de los siguientes índices espectrales: NDVI, SAVI, DVI, MSAVI2 y BI2, de estos cinco índices se seleccionará el que mejor caracterización arroje y a partir de él se realizaran los demás procesos. Cabe resaltar que se utilizarán Índices de Vegetación, ya que, la zona de estudio se dio como una expansión urbana no planificada , por lo cual, la geografía de la zona tiene características rurales dentro de ellas que presenta gran cantidad de vegetación, además dentro de la información básica del Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC) la parte izquierda de la zona de estudio se encuentra dentro del perímetro rural, mientras que la parte derecha de la zona de estudio no se reconoce ni dentro del perímetro urbano ni rural. En un análisis multitemporal realizado sobre el área de influencia del rio Bogotá se concluyó que: "Los índices de vegetación permitieron realizar una eficiente discriminación de coberturas, indicando cuales tonalidades representan ausencia o vigorosidad en la cobertura vegetal, de acuerdo con los valores de reflectividad"(Herrera, 2018). A continuación se define cada uno de los índices a aplicar:

- NDVI: El índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) es una aplicación de procesos de mejora mediante operaciones matemáticas entre bandas de sensores satelitales (Melo, Sales, y Oliveira, 2011). Para (Díaz, 2015) este índice se basa en el peculiar comportamiento radiométrico de la vegetación, relacionado con la actividad fotosintética y la estructura foliar de las plantas, permitiendo determinar la vigorosidad de la planta. Los valores del NDVI están en función de la energía absorbida o reflejada por las plantas en diversas partes del espectro electromagnético. La respuesta espectral que tiene la vegetación sana, muestra un claro contraste entre el espectro del visible, especialmente la banda roja, y el Infrarrojo Cercano (NIR). La ecuación para aplicar este índice es:

$$NDVI = \frac{NIR - Red}{NIR + Red} \tag{5}$$

- SAVI: Basándose en Huete y Conae, los autores (Arboit y Maglione, 2018) definieron que el Índice de Vegetación Ajustado al Suelo a diferencia del NDVI tiene en cuenta la proporción de vegetación/suelo observada por el sensor, para incluir explícitamente el factor suelo, se incluye un parámetro "L", que ajuste el índice a una reflectividad promedio del fondo. Este índice se calcula como la diferencia normalizada entre la banda roja (R) y la banda del infrarrojo cercano (NIR) ajustado con un factor "L", que es la componente de brillo del suelo que se define con un valor de 0.5, ya que se ajusta mejor a todo tipo

de cobertura. La ecuación para aplicar este índice es:

$$SAVI = \frac{NIR - Red}{NIR + Red + L} * (1 - L) \tag{6}$$

- DVI: El índice de Vegetación de Diferencia se obtuvo restando la reflectancia roja de la reflectancia del infrarrojo cercano. Es más simple que el índice NDVI. Este índice es computacionalmente más fácil que el índice PVI, el rango de este índice es infinito (Naji, 2018). La ecuación para aplicar este índice es:

$$DVI = NIR - Red \tag{7}$$

- MSAVI2: El Índice de vegetación ajustada de suelo modificado (MSAVI2) minimiza el efecto del terreno desnudo en el SAVI (ArcGIS, 2022). La ecuación para aplicar este índice es:

$$MSAVI2 = (1/2) * (2 * (NIR + 1) - \sqrt{(2 * NIR + 1)^2 - 8(NIR - Red))} \tag{8}$$

- BI2: El índice acumulado no dedicado,es una versión alternativa del índice de brillo (BI) y se denomina segundo índice de brillo (BI2). Este fue desarrollado inicialmente para la identificación de suelo desnudo basado en el cálculo de un valor de brillo promedio de la imagen multibanda. El índice BI2 se basa en la cuantificación de Albedo sobre un intervalo espectral visible y es, por lo tanto, un buen candidato para un intento de extracción de áreas construidas (Gadal y Ouerghemmi, 2019). La ecuación para aplicar este índice es:

$$BI2 = \sqrt{((Red^2 + Green^2 + NIR^2)/3)} \tag{9}$$

5.1.11. Clasificación supervisada

Según (Ingeoexpert, 2022) El propósito de los procedimientos de clasificación de imágenes de satélite es categorizar automáticamente todos los píxeles en una o diversas clases temáticas. Esta información categorizada se utiliza posteriormente para generar mapas temáticos. En este caso, el patrón espectral presente dentro de la información de cada píxel se usa como una base numérica para la categorización; es por ello que diferentes tipos de objetos presentan diferentes combinaciones de ND (números digitales) basados en su inherente reflectancia espectral y propiedades de emisividad. Los métodos de clasificación se dividen usualmente en dos tipos, en función de la manera en la que se obtienen las estadísticas de las categorías definidas durante la fase de entrenamiento: métodos supervisados y métodos no supervisados.

En el caso de las clasificaciones supervisadas, se requiere del conocimiento de la zona de estudio, adquirido por experiencia previa o por la realización de un trabajo de campo. Es decir, que el intérprete debe tener una gran familiaridad con el área de interés, para poder interpretar y delimitar sobre la imagen, áreas suficientemente representativas, denominadas áreas o regiones de interés (ROI por sus siglas en inglés), de cada una de las categorías representadas y que forman parte de la leyenda. Los pasos básicos para realizar una clasificación supervisada son los siguientes:

- Etapa de entrenamiento: en esta etapa el intérprete identifica áreas de entrenamiento representativas, y genera una descripción numérica de los atributos espectrales de cada categoría de cobertura de la tierra por escena.

- Etapa de clasificación: Cada píxel es categorizado y asociado a una determinada categoría de la leyenda de acuerdo a su mayor semejanza. En el caso que el píxel sea insuficientemente similar, este se catalogará como "desconocido".
- Etapa de análisis de precisión y verificación de resultados: La estimación de la exactitud de una clasificación es el grado de concordancia entre las clases asignadas por el clasificador y los datos tomados en el terreno obteniendo una estimación más realista de los errores siempre y cuando la muestra de pixeles sea lo suficientemente

5.1.12. Softwares implementados

- Erdas Imagine: Es un software que se utiliza para trabajar con imagen de satélite y fotografías aéreas. Esta herramienta pertenece a la empresa Hexagon y presenta unas capacidades muy potentes para el procesamiento, análisis e interpretación de información ráster, así como trabajar con datos vectoriales. Pero no solo esto, sino que este programa permite visualizar resultados en 2D, 3D y crear vistos y composiciones de mapa convirtiéndose por tanto en una herramienta que cubre todas las necesidades de teledetección, fotogrametría y SIG (Technologies, 2021).

  Para (Hexagon, 2022) es un software basado en ráster y fácil de usar, diseñado específicamente para extraer información de las imágenes.Es perfecto tanto para principiantes como para expertos,ya que permite procesar imágenes como un profesional experimentado, independientemente de la experiencia en imágenes geográficas. ERDAS IMAGINE es el paquete más poderoso para información derivada (producción de datos), que admite múltiples flujos de trabajo, que incluyen:

  - Conversión de datos
  - Ortorrectificación
  - Equilibrio de color, creación de mosaicos y compresión
  - Mapeo de la cobertura terrestre y categorización del terreno
  - Edición y clasificación Lidar
  - Generación e impresión de mapas e informes a través del compositor de mapas, o Microsoft PowerPoint o Word
  - Captura y actualización de características
  - Modelado y análisis espacial
  - Creación, edición y análisis de terrenos

  Finalmente, desde su lanzamiento en 1991, ERDAS IMAGINE ha ido cambiando la forma de trabajar de los administradores de recursos, planificadores, ingenieros forestales, geocientificos y cartógrafos, debido a que entrega a los usuarios la habilidad para integrar datos en formato raster y vector, en un ambiente gráfico que facilita el análisis y salida. ERDAS IMAGINE (TM) , ofrece a esta amplia gama de profesionales, dinámicas herramientas que pueden ser utilizadas en cualquier orden y modo, además posee una Interfaz Gráfica de Usuario (GUI) de fácil uso, que corre bajo X WINDOWS (Vojkovic, 1993).

- Matlab: (MathWorks, 2022) lo define como un software que utiliza un lenguaje de alto desempeño diseñado para realizar cálculos técnicos; integrando el cálculo, la visualización y la programación en un solo espacio; es una herramienta usada para el análisis, investigación y desarrollo de nuevos productos tecnológicos MATLAB. Es usado ampliamente en:

  - Cálculos numéricos
  - Desarrollo de algoritmos
  - Modelado, simulación y prueba de prototipos
  - Análisis de datos, exploración y visualización
  - Graficación de datos con fines científicos o de ingeniería
  - Desarrollo de aplicaciones que requieran de una interfaz gráfica de usuario (GUI, Graphical User Interface).

  Así mismo, para (Congo, 2015) Matlab es un poderoso lenguaje de programación de alto nivel que incluye conceptos comunes a la mayoría de lenguajes de programación. Puesto que se basa en la creación de scripts, la creación de programas es mucho más fácil ya que nos brinda un entorno interactivo para el desarrollo de algoritmos, visualización de datos, análisis de datos y cálculo numérico. Sea cual sea la necesidad que se tenga (un análisis, una estadística, un algoritmo, informes o simulación), podemos ejecutar programas o guiones que contengan comandos MATLAB, observar los resultados, ejecutar otro comando MATLAB que interactúe con la información almacenada en memoria, observar sus resultados y así sucesivamente. El lenguaje de programación Matlab permite manipular vectores o matrices como simples variables. Debido a esto es ideal para cálculos que involucran matrices, ya que los ejecuta sustancialmente más rápido que otros lenguajes de alto nivel.

- ArcGis: Para (Pucha, Fries, Cánovas, Oñate, y Pucha, 2017) quienes citan a (Olaya, 2011) ArcGIS Desktop (En adelante ArcGIS) es el principal componente de la suite de aplicaciones ArcGIS de ESRI, y el software que contiene las funcionalidades clásicas del SIG de escritorio. ArcGIS es un conjunto de herramientas que permiten la visualización y manejo de información geográfica, y que cuenta con una arquitectura extensible mediante la que pueden añadírsele nuevas funcionalidades. Estas son las conocidas extensiones, entre las cuales se pueden destacar Spatial Analyst (análisis ráster), 3D Analyst (análisis 3D y de relieve) o Geostatistical Analyst (geoestadística).

  Por otra parte, (ESRI, 2022) define que ArcGIS es un completo sistema que permite recopilar, organizar, administrar, analizar, compartir y distribuir información geográfica. Como la plataforma líder mundial para crear y utilizar sistemas de información geográfica (SIG), ArcGIS es utilizada por personas de todo el mundo para poner el conocimiento geográfico al servicio de los sectores del gobierno, la empresa, la ciencia, la educación y los medios. ArcGIS permite publicar la información geográfica para que esté accesible para cualquier usuario. El sistema está disponible en cualquier lugar a través de navegadores Web, dispositivos móviles como smartphones y equipos de escritorio.

Es importante aclarar que: ArcGIS Desktop tiene dos componetes principales como lo son ArcMap (aplicación para entrada de datos, búsquedas estadísticas y geográficas, además de output (mapas impresos)) y por otro lado está ArcCatalog (herramienta para organizar y documentar los datos geográficos (metadata)). Además dentro de las herramientas contiene la caja de ArcTools (utilizado en el geoprocesamiento: combinar capas de información, transformación de sistemas de coordenadas, análisis espacial, entre otros) (PRIAS, 2013).

5.2. Estado del arte y Antecedentes

Esta segunda sección se encuentra constituida por un breve recuento de las diferentes investigaciones a nivel nacional e internacional que se hayan realizado sobre: Catastro, Formación Catastral, Asentamientos Informales, Procesamiento Digital de Imágenes, Fusión de imágenes, Índices espectrales y sensores WorldView-3 y PlanetScope.

A nivel nacional en el estudio de (Ramos, 2003) se menciona que el catastro colombiano ha ido evolucionando no solo desde su concepción, la cual actualmente es multifinalitaria, sino también desde sus metodologías de adquisición de información y tecnologías utilizadas, acercándose a la visión de un catastro que se consolide como un Sistema de Información de Tierras. En ese sentido, Colombia ha venido desarrollando diferentes programas y proyectos de modernización catastral para llegar a contar con información actualizada, confiable y de fácil acceso, que garanticen su sostenibilidad en el tiempo, ya que, las organizaciones catastrales deben asegurar un proceso de modernización continuo que les permita la utilización de recurso humano idóneo y la actualización constante de hardware, software e información. Es así como estos proyectos de modernización hacen más eficiente los procesos catastrales y facilitan el acceso a la información generada. Este mismo autor recalca la importancia de diseñar y ajustar las metodologías catastrales, para que sean acordes con la infraestructura e información que se va a contar, he aquí la importancia de proponer o generar nuevas metodologías que permitan modernizar el catastro con la utilización de métodos indirectos para la captura de información.

A partir de lo anterior, se habla del primer proceso dentro del catastro colombiano, es decir la formación catastral, que se constituye como la primera vez que se levanta información de un predio. Teniendo en cuenta la concepción multipropósito del catastro, (Escobar y Cárdenas, 2018) en su artículo resaltan que una de las necesidades más apremiantes del sistema es que debe existir la participación de operadores especializados en formación masiva catastral, ya que, se requiere un grupo plural de operadores, con alta dosis de innovación y enfoque competitivo, de modo que se estimulen los cambios que la adopción del catastro multipropósito requiere, esto se puede implementar gracias a que desde hace ya varios años, y en varios países, el sector privado ha venido tomando parte en el desarrollo de esas etapas y su participación no solo es comúnmente aceptada sino que se considera indispensable, por ejemplo en los países de la Unión Europea la etapa en la que más participa el sector privado es en la de levantamiento o formación catastral. Finalmente el articulo concluye que: Cada país tiene una combinación diferente de los niveles de participación del privado aunque, en términos generales, se encuentra que son las actividades técnicas las que son encargadas a operadores privados, mientras que las actividades con connotaciones legales están normalmente en manos del sector público. Por otra parte, Colombia aun cuenta con áreas no formadas catastralmente, para (Pérez y Restrepo, 2018) esta situación se debe al enfoque fiscal que tradicionalmente había tenido el catastro, en

el que se le conciba como un instrumento para el fortalecimiento de los fiscos locales,limitando su uso como principal herramienta e insumo de ordenamiento territorial, para el aseguramiento jurídico de la propiedad y para la protección y gestión de áreas ambientalmente estratégicas, entre otros usos.

Ahora bien entrelazando tanto el concepto de catastro multipropósito como el proceso de formación catastral, se tiene que el levantamiento de información física independientemente de la situación jurídica del predio se puede realizar, es por lo anterior que el área de estudio del presente documento es una zona que el municipio de Sabana de Torres considera como asentamientos informales, la cual efectivamente no cuenta con información a nivel predial. Sobre los asentamientos informales hay varios estudios a nivel continental, ya que, es un fenómeno que comúnmente se presenta en América Latina, la mayoría de ellos enfocados a aspectos sociales como: la pobreza, el acceso a los servicios públicos y la calidad de vida, también se habla de aspectos ligados al catastro como lo son la planeación del territorio. De este último (Lombard, 2012) cita que el problema de cómo la planeación debería tratar los asentamientos informales aún no ha sido resuelto. El hecho de que los urbanistas no han podido (¿o no han querido?) comprender cómo viven los habitantes de estos asentamientos y la incapacidad de las agencias para satisfacer la demanda de vivienda y servicios hacen que los residentes urbanos marginados sigan buscando maneras de acceder a la tierra, la vivienda y la infraestructura por sus propios medios. El objetivo del estudio de este autor era demostrar como los residentes de asentamientos informales terminan teniendo participación en la planeación urbana, ya que obligan al Estado a generar una solución.

Siguiendo con lo anterior, la pérdida en la planificación de las ciudades genera dificultad en el equipamiento de servicios, ya que, se debe a nivel constitucional "garantizar una vivienda digna que supone la prestación de servicios públicos básicos como acueducto y alcantarillado"(Decastro, Hoyos, y Umaña, 2011). De igual manera en su tesis doctoral (Puente, 2001) señala que el loteo informal en la periferia de la ciudad de Bogotá al igual que muchos otros lugares que se prestan para este tipo de asentamientos, no presenta condiciones óptimas para la urbanización, y por el contrario presentan condiciones precarias, las cuales dificultan el acceso de servicios públicos, dotacionales y de equipamiento, también se menciona que el proceso de legalización de estos asentamientos, es tedioso, tanto para las comunidades, cómo para el estado.

Como se puede observar, los asentamientos informales son un tema amplio que abarca diferentes características del territorio, es por ello que desde un punto de vista catastral se plantea el uso del procesamiento digital de imágenes como una herramienta que permita por lo menos la caracterización física de estas zonas. A nivel internacional, (Zhang y Du, 2015) dicen que las escenas urbanas son fundamentales para evaluar los paisajes urbanos y analizar los arreglos espaciales de las zonificaciones funcionales. Por ello, es importante obtener la información sobre escenas urbanas de forma automática a partir de sensores remotos de alta resolución, es así como, utilizan imágenes hiperespectrales realizando zonificaciones funcionales urbanas y suburbanas, analizando la evolución temporal de cambios en las mismas. En este mismo sentido, en su trabajo (Jensen y Cowen, 1999) analizan el papel de las tecnologías de detección remota para mapear diferentes aspectos del entorno construido. Detalla cómo los desarrollos en los sistemas de imágenes satelitales podrían aumentar y sustituir los levantamientos convencionales en el terreno y la cartografía urbana. Se centra en la importancia de considerar tanto la escala espacial como la resolución temporal de las diferentes tecnologías de imagen y qué aspectos de los

entornos urbanos pueden capturar de manera efectiva. Finalmente concluyen que las tecnologías de detección remota se han convertido en un componente vital en la producción cartográfica y se utilizan de forma rutinaria en una variedad de aplicaciones. Por ejemplo, (Castellanos, 2016) realizo procesamiento digital de imágenes, a partir procesos de interpretación visual de imágenes, índices espectrales y fusión de imágenes, con el objetivo de caracterizar zonas de minería a cielo abierto. Igualmente, (Treviño, 2001) en su estudio realizado en Mexico elaboró un mapa para los bosques de pino piñonero a partir del procesamiento digital de una imagen Landsat TM, la cual fue procesada con los programas Erdas TM versión 7.5 e Image TM versión 8.02 y el SIG se integró mediante el programa ARC/INFO TM. Finalmente, (Li y cols., 2018) por medio de imágenes satelitales ampliamente disponibles y gratuitas, crearon una base de datos de información de las formas de los edificios y realizaron un análisis de agrupamiento de las características geométricas para definir una serie de arquetipos representativos de la demanda de energía de calefacción y refrigeración del distrito.

Una técnica bastante utilizada en el procesamiento digital de imágenes es la fusión de imágenes, (Lillo y Gonzalo, 2008) en su estudio "Aplicación de la Metodología de Fusión de Imágenes Multidirección-Multiresolución (MDMR) a la Estimación de la Turbidez en Lagos" concluyen que la utilización de imágenes de satélite obtenidas a partir de la fusión de imágenes PAN y MULTI, mediante la metodología MDMR, aumenta el rango dinámico de los valores de ND implicados en la estimación del parámetro biofísico de turbidez, preservando las características espectrales de la imagen MULTI. Ello ha permitido una mejor discriminación de estos valores. Además la mayor resolución espacial de estas imágenes proporciona una mejora en su distribución espacial. Por lo que este tipo de imágenes se presentan como una buena alternativa, sin costo económico añadido, para ayudar a la toma de decisiones en la gestión del agua en los sistemas lénticos. También sobre fusión de imágenes a nivel internacional existe un libro titulado "Data Fusion. Definitions and Architectures - Fusion of Images of Different Spatial Resolution" con este documento, (Wald, 2002) espera que la fusión de datos sea mejor comprendida, aceptada y utilizada de manera más eficiente, por tal razón, describe detalladamente las técnicas de fusión de imágenes. Otro libro importante a nivel internacional es "Image Fusion: Algorithms and Applications" los autores (Cacciola, Morabito, y Simone, 2008) recalcan que la técnica de fusión de imágenes puede ayudar a alcanzar objetivos de procesamiento e interpretación que no se pueden lograr mediante la adquisición y el procesamiento con un solo sensor, también presentan algunos algoritmos de fusión basados en metodologías de inteligencia computacional y filtrado de Kalman multiescala. Aquí los algoritmos propuestos se aplican a dos tipos de problemas: una aplicación de detección de objetos, clasificación y segmentación por teledetección realizada sobre datos reales disponibles de campañas experimentales y un problema de prueba/evaluación no destructiva de detección de defectos mediante registros electromagnéticos y de ultrasonido. En ambos problemas, se muestra que las técnicas de fusión logran un rendimiento superior con respecto a la modalidad de imagen de un solo sensor.

Otra técnica ampliamente utilizada es la aplicación de índices espectrales en la determinación de coberturas del suelo, en el trabajo de (Buzzi y cols., 2017) titulado "Múltiples índices espectrales para predecir la variabilidad de atributos estructurales y funcionales en zonas áridas" evaluaron la capacidad de 7 índices espectrales (NDVI, GNDVI, RVI, DVI, EVI2, SAVI y MSAVI2) para predecir la variabilidad espacial de un atributo estructural (cobertura vegetal de especies perennes) y un atributo funcional (productividad forrajera) en zonas áridas utilizando el satélite SPOT 5. Finalmente llegaron a la conclusión de que principalmente los índices

espectrales: GNDVI, el MSAVI2, el NDVI y el RVI, les arrojaron mejores resultados y que la habilidad de los índices espectrales para detectar la variación de las características ecosistémicas radica en las particularidades de cada uno. De zonas áridas pasamos a zonas urbanas, las cuales para (Fabijańczyk y Zawadzki, 2022) tienen una estructura altamente complicada, incluyendo áreas de vivienda, infraestructura de la ciudad, caminos, así como áreas verdes, es por ello que el objetivo principal de su estudio fue analizar las correlaciones espaciales entre el NDVI y el MSAVI2, índices calculados en Varsovia, que es una de las mayores aglomeraciones urbanas de Europa Central, lo importante de este trabajo es que nos muestra que no necesariamente tiene que ser una zona netamente rural para aplicarse índices de vegetación sino que estos también pueden ser de gran utilidad a la hora de hacer estudios en zonas urbanas. Siguiendo con lo anterior, (Gadal y Ouerghemmi, 2019) utilizando los sensores Sentinel- 2A y SPOT 6, la aplicación de índices espectrales (NDWI, BI2 y NDVI) y clasificación espectral lograron estimar dos categorías de áreas edificadas (es decir, áreas edificadas oscuras y áreas edificadas claras) sobre la ciudad de Yakutsk. Los índices espectrales se usaron y combinaron para estimar el oleaje provocado por el hombre.

Siguiendo con los índices espectrales, tenemos que (Mora, Ortiz, Cuellar, Torrejano, y Pastrana, 2018) en su estudio determinaron los índices de vegetación NDVI, GNDVI, RVI, GVI, NGRDI, RG, TVI, NRVI y DVI en un cultivo de arroz, luego realizaron un análisis de coeficiente de correlación múltiple (Pearson) y modelos de regresión lineal entre los índices de vegetación con el programa Infostat, los resultados que encontraron fueron que los mejores modelos de regresión lineal para estimar el estado de vegetación fueron GNDVI, NGRDI, NRVI y DVI. Y finalmente, se determinaron tres clústeres con NDVI, el primero con rangos de 0.63 a 0.99, el segundo entre 0.32 a 0.63 y el tercero de 0.1 a 0.3, lo que permitió analizar la vegetación. De igual manera, a nivel nacional (Parra y Hernández, 2010) elaboraron la identificación y delimitación de los humedales lénticos naturales del departamento del Valle del Cauca mediante el tratamiento digital de imágenes del satélite Quickbird, y utilizaron el Índice Normalizado de Diferencia de Vegetación para diferenciar los cuerpos de agua de la cubierta vegetal.Con todos los estudios mencionados anteriormente se puede explicar que la aplicación de índices espectrales se realiza en diferentes tipos de cobertura y en la mayoría se obtienen buenos resultados, lo cual fundamenta que se utilice esta técnica en la caracterización física de asentamientos informales como se propone en el presente documento.

Enfocándonos ahora en el WorldView-3 (Xian, Shi, Dewitz, y Wu, 2019) en su estudio exploran el uso de datos de detección remota que tienen diferentes resoluciones espaciales y espectrales para evaluar su desempeño en la cuantificación de superficies impermeables en áreas urbanas ubicadas en San Francisco, California, Dallas y Texas, emplearon imágenes satelitales de WorldView-3, Sentinel-2 y Landsat 8 para cuantificar las ISA (Porcentaje de superficie impermeable) desarrolladas en las tres áreas, todo justificado en que la población mundial está aumentando, y desde 2008 más de la mitad de la población mundial vive en centros urbanos, es por ello que asociado con el crecimiento de la población está la expansión del uso del suelo urbano y la cobertura del suelo en todo el mundo. El desarrollo urbano generalmente crea varias áreas de superficies impermeables que no se evaporan ni transpiran. Este estudio encontró que las imágenes de WorldView-3, especialmente en la estimación de 20 m, superaron a los otros dos sensores con errores relativamente menores en la estimación de la impermeabilidad en áreas urbanas que tienen una cubierta vegetal relativamente seca y escasa. En cuanto a PlanetScope, (Cheng y cols., 2020) demostró su capacidad para estimar la fenología de las comunidades

de vegetación e incluso de árboles dispersos individuales. Esto puede ayudar a comprender mejor el funcionamiento de los ecosistemas a escala local en paisajes heterogéneos como los pastizales semiáridos.El estudio a nivel internacional de (Huang y Roy, 2021) proporciono una comparación exhaustiva de la reflectancia de la superficie y las diferencias derivadas del índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) entre las dos primeras generaciones de sensores Planetscope, conocidos como Planetscope-0 y Planetscope-1.

6. Marco metodológico

Para lograr cumplir con el objetivo del presente proyecto, el cual consiste en obtener información línea base de asentamientos informales mediante métodos indirectos con el fin de facilitar el proceso de formación catastral, se plantea el siguiente marco metodológico, el cual, parte de la idea de que en muchas ocasiones no se cuenta con escenas satelitales de alta resolución, que proporcionen una banda de infrarrojo cercano, es así cómo, se puede obtener dicha banda desde otra imagen satelital mediante fusión de imágenes, generando mayores oportunidades en la adquisición de la información predial vía satélite. Es de resaltar que esta metodología se plantea bajo la concepción del Catastro multipropósito , ya que según el decreto 148 de 2020 dentro de los procedimientos del enfoque multipropósito se contempla la innovación y evolución continua [4], además de que en métodos de recolección de información se contemplan los métodos indirectos [5]. A continuación en la Figura 6 se muestra el Flujograma de Procesos planteado:

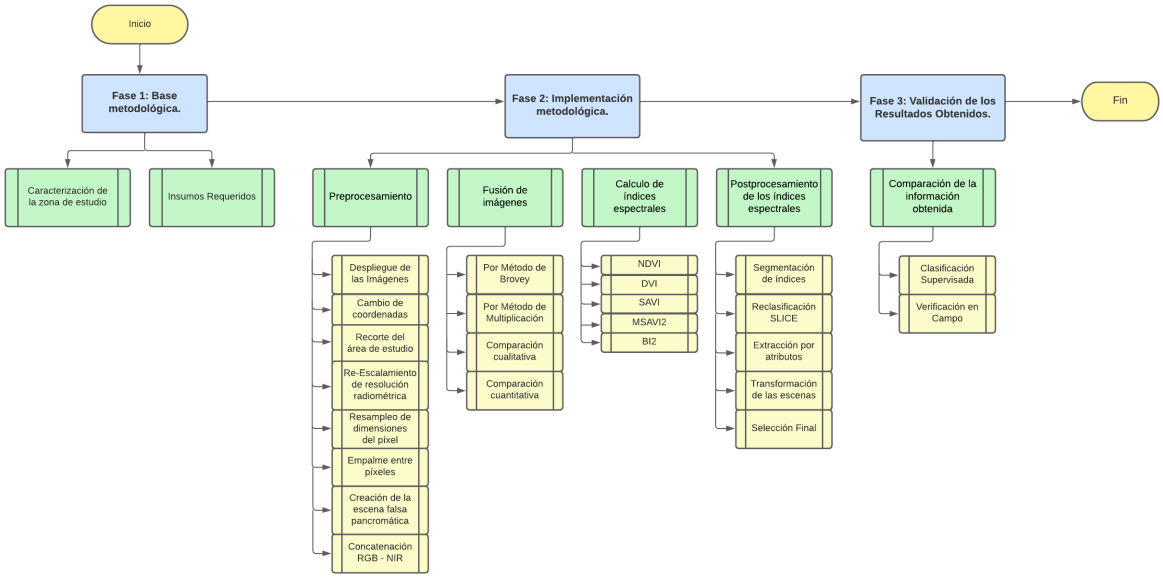


Figura 6: Flujograma de Procesos

[4]Los gestores catastrales deberán definir mecanismos transformadores para facilitar los trámites, reducir los costos, incentivar la competitividad y desarrollar servicios de alta calidad para el uso y acceso de la información catastral.

[5]Son aquellos métodos de identificación física, jurídica y económica de los bienes inmuebles a través del uso de imágenes de sensores remotos, integración de registros administrativos, modelos estadísticos y econométricos, análisis de Big Data y demás fuentes secundarias como los observatorios inmobiliarios, para su posterior incorporación en la base catastral.

6.1. Fase 1. Base metodológica

6.1.1. Caracterización de la zona de estudio

Se realizará el análisis de documentos pertinentes con la investigación, por ejemplo: los Esquemas de Ordenamiento Territorial y los Planes de Desarrollo, con el fin de determinar bajo qué normativa territorial está regido el Municipio. También se revisarán antecedentes catastrales y condiciones geográficas, ya que, es importante tener claro qué dinámica catastral y geográfica se presenta en el área de estudio planteada, esta área se definirá a partir de la información suministrada por la Alcaldía municipal y por el Instituto geográfico Agustín Codazzi, ya que la información catastral de Sabana de Torres está bajo la jurisdicción de esta entidad.

6.1.2. Insumos requeridos

Para el desarrollo de la metodología planteada se requieren dos imágenes satelitales del área de estudio; una imagen de alta resolución espacial, la cual, es importante que cuente con las bandas RGB (Red-Green-Blue), para efectos de la fusión esta imagen no debe contener información del infrarrojo cercano NIR. La otra imagen con la que se debe contar es una imagen multiespectral, que necesariamente debe contener la banda del infrarrojo cercano. Es importante recalcar que la fecha de toma de las imágenes deben ser muy cercanas entre ellas y ambas imágenes deben tener sus respectivas correcciones. En cuanto a los softwares empleados son necesarios: Erdas, Matlab y ArcGis, sin embargo algunos procesos planteados en la metodología se pueden realizar en otros softwares como por ejemplo Qgis, aquí es importante contar con un computador de gama media que ejecute los programas sin inconveniente.

6.2. Fase 2. Implementación metodológica

6.2.1. Preprocesamiento

Con la información en crudo, es decir, con las escenas satelitales tal cual como fueron suministradas no es posible llevar a cabo el proceso de fusión de imágenes, dado que estas: Se encuentran en un sistema de coordenadas diferente cada una, presentan distintas resoluciones radiométricas, su resolución espacial a pesar de ser distinta debe estar reproyectada a 0.3 para no incurrir en errores, los píxeles deben estar empalmados y el área de la imagen debe coincidir.

Adicional a lo anterior, es preciso recordar que el proceso de fusión de imágenes se lleva a cabo entre una escena pancromática de mayor resolución espacial y una escena multiespectral de menor resolución espacial, sin embargo cuando no se cuenta con una escena pancromática se puede realizar el cálculo de una escena falsa pancromática cómo la que aquí se implementara para posteriormente ser usada en la fusión. Por otro lado, se va a fusionar únicamente la banda infrarroja cercana de PlanetScope de menor resolución espacial, por lo cual también se debe realizar con un proceso de exportación de dicha banda y concatenación a las bandas RGB de mayor resolución espacial para su posterior fusión.

- **6.2.1.1. Despliegue de las imágenes**

  Se inicia desplegando las escenas satelitales WorldView 3 y PlanetScope, para esto en el software Erdas se abre el archivo que contiene cada una de las escenas en formato

".tif". Después se procede a verificar la información de cada una de las escenas para así determinar sus características, y poder iniciar el preprocesamiento, para posteriormente implementar la metodología propuesta. Para ello se da clic izquierdo sobre cada una de las escenas en el panel de 2d view en Erdas y en "Metadata", así se desplegará un panel con la información de cada escena.

- **6.2.1.2. Cambio de coordenadas**

Para efectos de cálculo y posteriores análisis de carácter cuantitativo se requiere que el sistema de referencia de ambas escenas se encuentre en EPSG 32618 que corresponde a UTM zona 18 Norte, un sistema de coordenadas proyectado que es métrico y permitirá realizar el cálculo de las resoluciones espaciales de acuerdo al GSD de cada pixel. Notando que la escena PlanetScope ya se encuentra en dicho sistema de coordenadas, se transforma el sistema de la escena WorldView 3, para esto es necesario dirigirse al módulo "Raster / Spatial / Reproject"

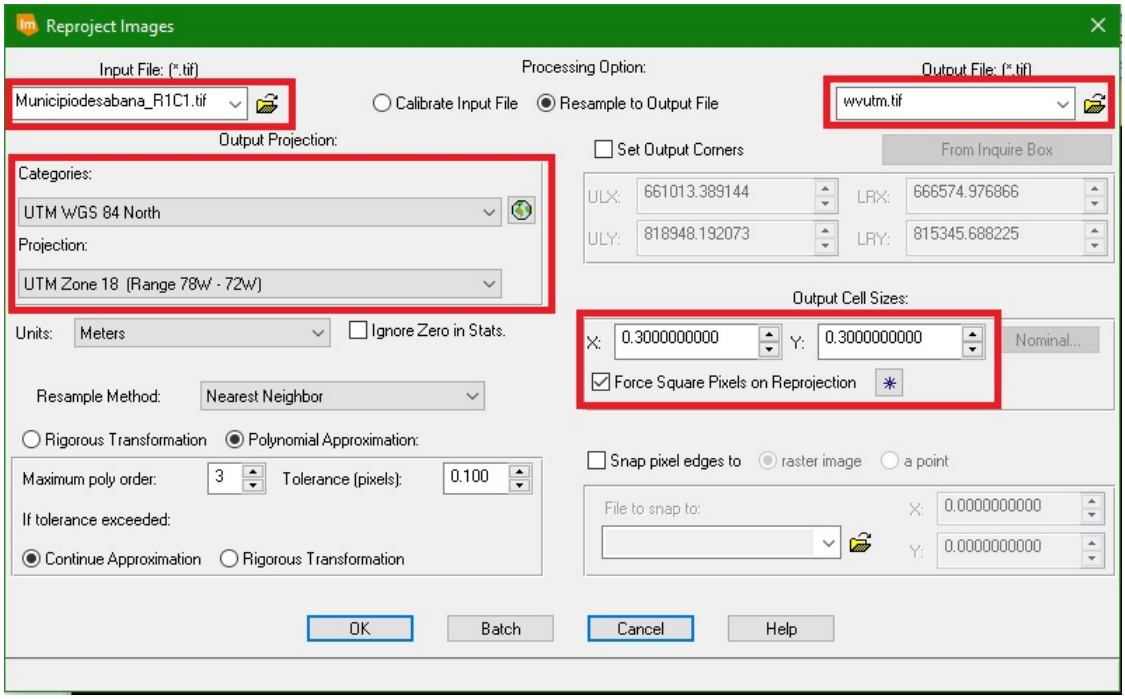


Figura 7: Reproyección escena satelital WorldView 3

En la Figura 7 se observa el panel donde se ingresa la escena a la cual se le cambiara el sistema de coordenadas, se ingresa UTM WGS 84 UTM zona 18 norte y se dice que el valor del píxel será 0.3 m forzando a que el mismo sea cuadrado.

- **6.2.1.3. Recorte del área de estudio**

Es importante para la aplicación de la metodología realizar el recorte del área de estudio propuesta, la cual, para este caso se encuentra ubicada en la zona norte del casco conurbano del municipio de Sabana de Torres, departamento de Santander Colombia. Esta zona se caracteriza por tener procesos de informalidad en la tierra, además de que

actualmente solo cuenta con información a nivel perimetral más no a nivel predial. Este recorte agiliza el tiempo de ejecución de los diferentes procedimientos que se realizarán, aquí es importante tener en cuenta que el área debe ser exactamente la misma en ambas escenas, y como ya cuentan con el mismo sistema de coordenadas se puede validar la superposición al seleccionar el área de estudio; para ello es necesario dirigirse a "Home/ Inquire/ Inquire box" , y se desplegará un 'box' como se muestra en la Figura 8, el cual se debe ubicar en el área que se desea recortar.

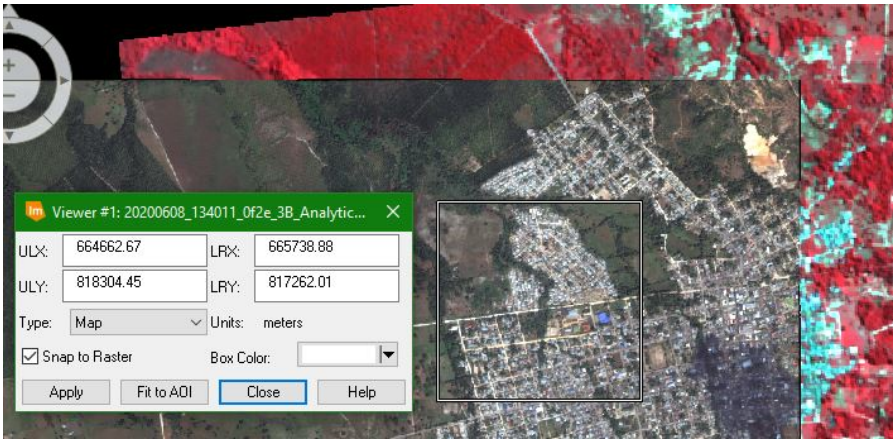


Figura 8: Selección del Inquire Box

Una vez se haya seleccionado el inquire box es necesario ir a "Raster / Subset / Create Subset Image"; y dentro del panel que se muestra en la Figura 9 se marca la imagen de entrada y salida, y se da clic en From inquire box.

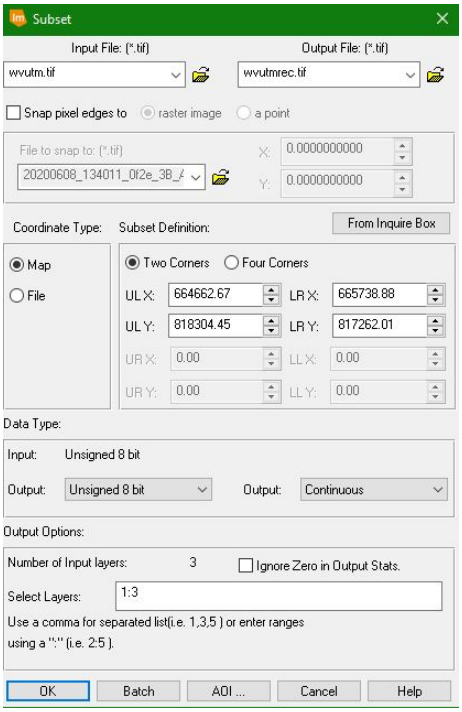


Figura 9: Subset Image

Cabe resaltar que este proceso se realiza para ambas escenas satelitales (WorldView 3 y PlanetScope).

- **6.2.1.4. Re-Escalamiento de resolución radiométrica**

Ahora bien es necesario llevar la resolución radiométrica de la escena PlanetScope recortada de 16 a 8 bits, recordando que los mismos son los niveles de grises que puede tomar una imagen, los cuales en el caso de 8 bits serán de 0 a 255 tonos, para un total de 256. Para realizar esto es necesario dirigirse al panel "Raster / Radiometric / Rescale" , y como se muestra en la Figura 10 se ingresan los parámetros de entrada, salida y se da en Output Unsigned 8 bit.

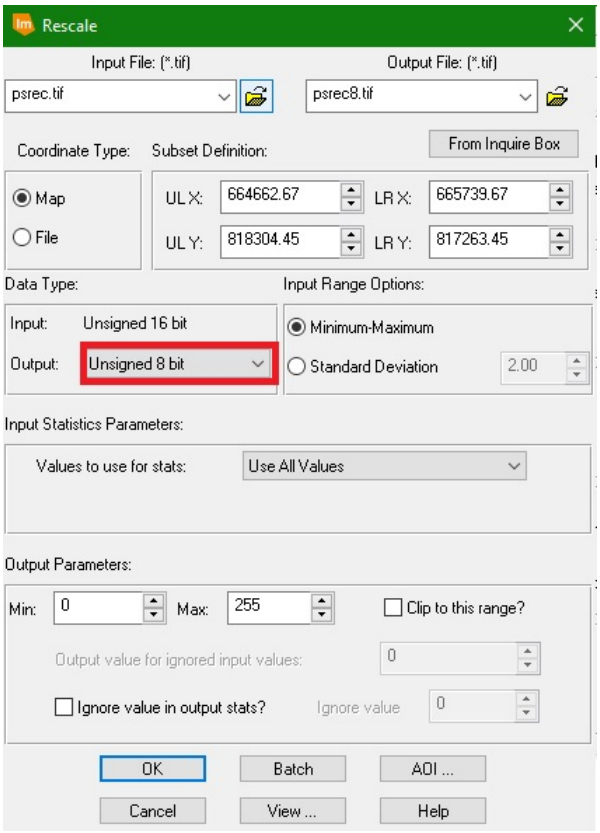


Figura 10: Re-Escalamiento del número de bits de la escena satelital PlanetScope

- **6.2.1.5. Resampleo de dimensiones del píxel de 3 a 0.3 metros**

Es indispensable que ambas escenas cuenten con la misma dimensión de sus píxeles para adelantar el proceso de fusión de imágenes, se debe pensar cómo el proceso a partir del cual un píxel de 3 metros será representado por 100 píxeles de 0.3 metros, 100 píxeles que contendrán el mismo valor espectral o nivel digital pero que tendrán una partición homóloga a la resolución espacial de la escena a fusionar de mayor resolución espacial.

Para llevar a cabo este resampleo de píxel es necesario dirigirse a "Raster / Spatial / Resample Pixel Size", como se evidencia en la Figura 11 en dicho panel se dan los

parámetros de entrada y salida, se da clic para forzar que el píxel sea cuadrado y se cambia el valor original de 3 a 0.3 metros.

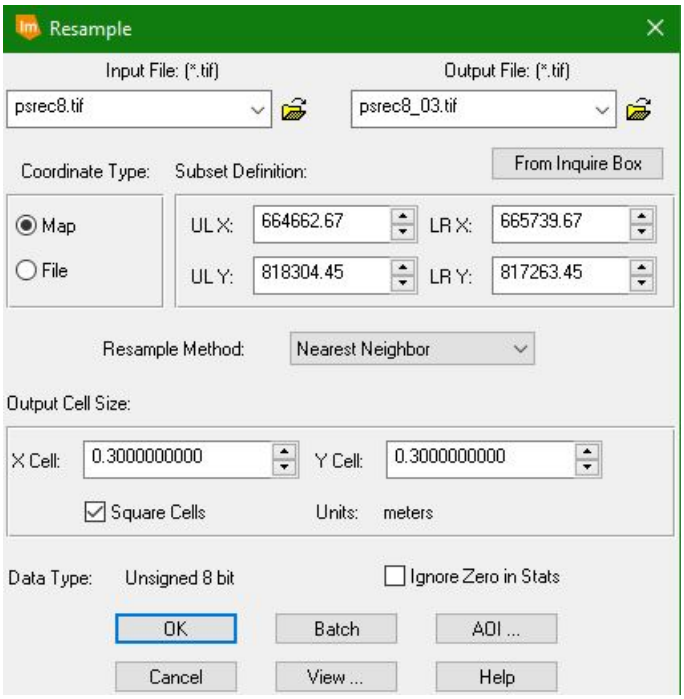


Figura 11: Resampleo de píxel de 3 a 0.3 metros escena satelital PlanetScope

- **6.2.1.6. Empalme entre píxeles**

  Es de suma importancia que el empalme entre píxeles se de, para ello es necesario dirigirnos a "Home/Swipe" y se hace zoom y desplazamiento hasta el pixel de 3 metros, este debe coincidir espacialmente con los 100 pixeles de 0.3 metros. Si el mismo no se presenta tras los procesos derivados hasta el momento, se requiere realizar una concatenación de bandas entre las dos escenas preprocesadas y posteriormente separarlas, esto forzará a que los pixeles empalmen.

- **6.2.1.7. Creación de la escena falsa pancromática**

  Para generar la escena falsa pancromática, con la cual posteriormente se realizarán las fusiones de imágenes, se utilizará la siguiente ecuación:

$$FalsaPancromática = \frac{R + G + B}{3} \tag{10}$$

  Para la implementación de la anterior ecuación es necesario dirigirnos a "Toolbox / Modelmaker".

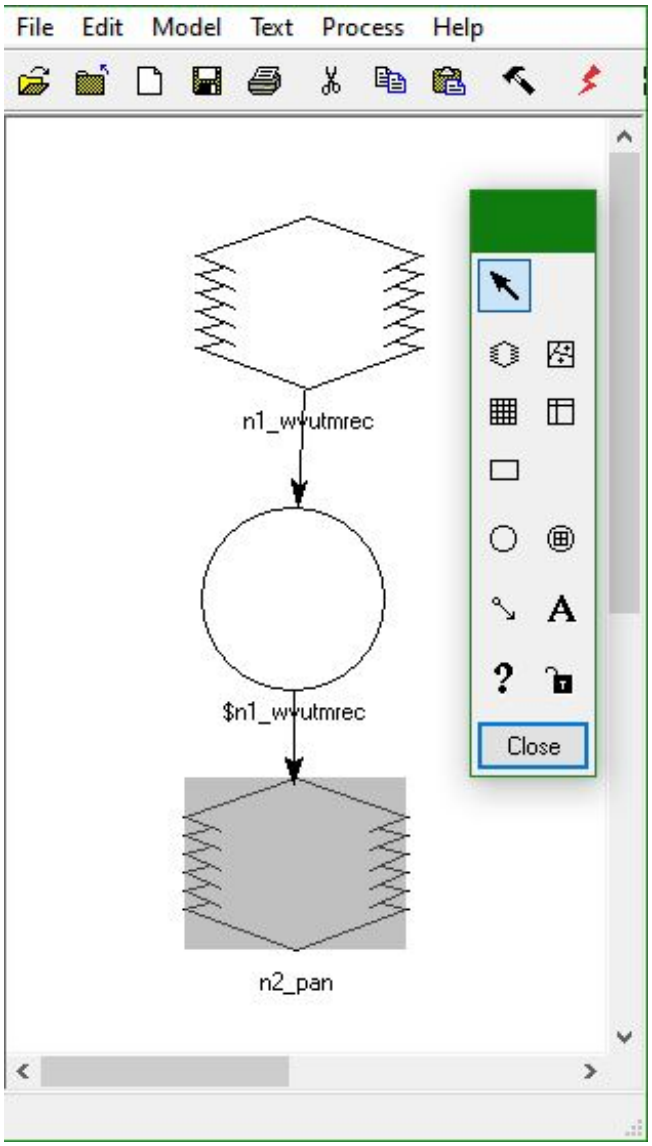


Figura 12: Modelmaker falsa pancromática

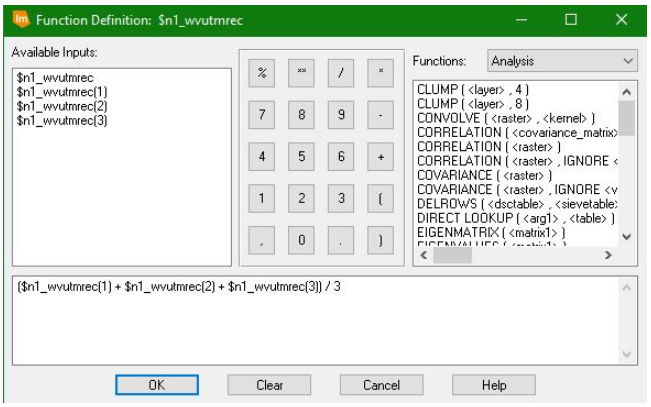


Figura 13: Ecuación falsa pancromática

En la Figura 12 se puede evidenciar la creación del modelo, mientras que en la Figura 13 se observa la implementación de la ecuación que creara la escena Falsa pancromática.

- **6.2.1.8. Concatenación RGB WorldView 3 - NIR PlanetScope como escena multiespectral para posterior fusión.**

  Es necesario contar con la escena multiespectral objeto de la fusión de imágenes, recordando que uno de los procesos ejecutados en el presente documento es llevar la escena NIR infrarrojo cercano a una mejor resolución espacial, todo con el fin de adelantar análisis espaciales que sirvan para generar información línea base a nivel predial para los procesos catastrales. Para llevar a cabo esto, es necesario dirigirse a "Raster / Spectral / Layer Stack", y como se muestra en la Figura 14 se selecciona como entrada las bandas RGB de mayor resolución espacial de WorldView 3 y la escena NIR de PlanetScope, se da la ruta de salida y se procesa.

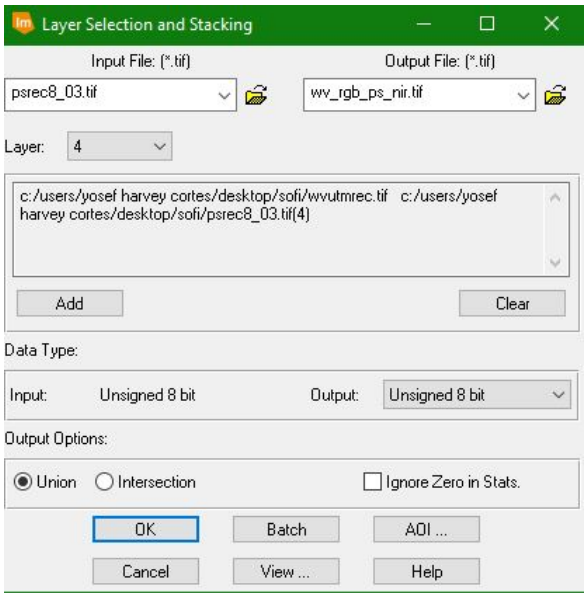


Figura 14: Layer Stack

6.2.2. Fusión de imágenes

- **6.2.2.1. Fusión de imágenes por Método de Brovey**

Para ejecutar el algoritmo de brovey es necesario dirigirse a "Raster / Pan Sharpen / Resolution merge" allí como se muestra en la Figura 15, se selecciona cómo escena de alta resolución la escena falsa pancromática, y cómo escena a fusionar la concatenación RGB WorldView - NIR PlanetScope, se selecciona el algoritmo de Brovey,con técnica de resampleo de vecino más cercano, se marca el Stretch y que se ignoren los valores 0.

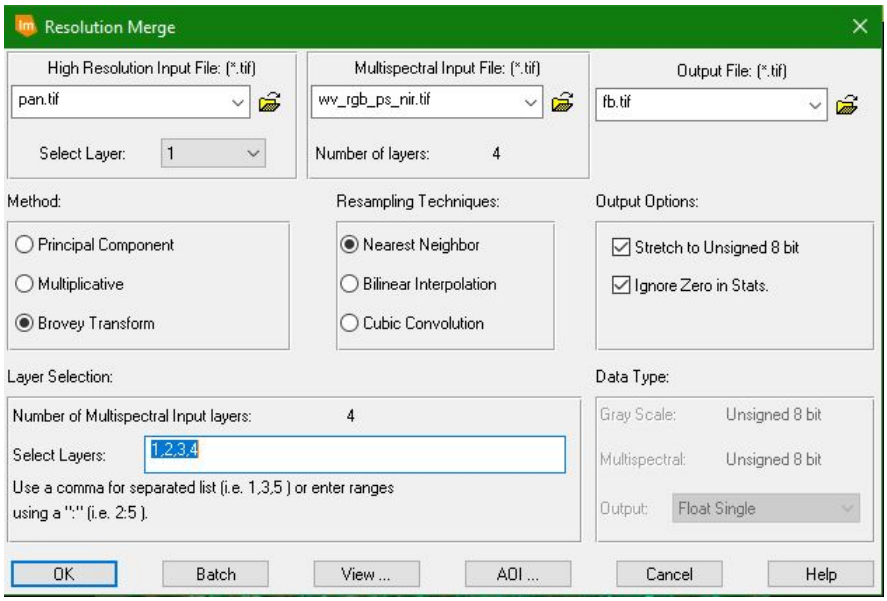


Figura 15: Fusión de imágenes por Método de Brovey

- **6.2.2.2. Fusion de imagenes por Método de Multiplicación**

  Para ejecutar el algoritmo de multiplicación es necesario dirigirse a "Raster / Pan Sharpen / Resolution merge" allí como se muestra en la Figura 16, se selecciona cómo escena de alta resolución la escena falsa pancromática, y cómo escena a fusionar la concatenación RGB WorldView - NIR PlanetScope, se selecciona el algoritmo de multiplicación, con técnica de resampleo de vecino más cercano, se marcamos el Stretch y que se ignoren los valores 0.

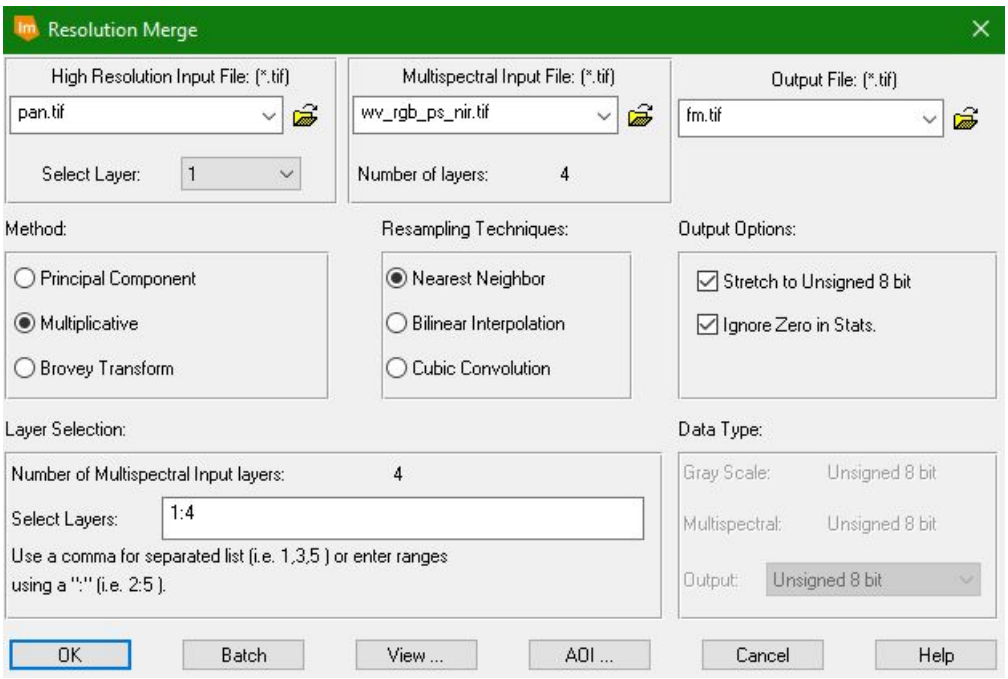


Figura 16: Fusión de imágenes por Método de Multiplicación

- **6.2.2.3. Comparación cualitativa de las escenas NIR fusionadas por método de Brovey y Multiplicación**

  Para llevar a cabo la comparación cualitativa entre las escenas previamente fusionadas se realiza la combinación de bandas con la banda del NIR fusionada para cada uno de los cañones, esto dará como resultado la representación de las bandas NIR fusionadas. Después de esto se realiza la comparativa visual entre las escenas y la escena NIR original, se compara aquella que adquiera mayor riqueza espacial sin perder mayoritariamente características espectrales. De igual manera, se realiza una comparación de lut value para tener un aproximado de la variabilidad por píxel, para ello se utiliza la herramienta inquire.

- **6.2.2.4. Comparación cuantitativa de las escenas NIR fusionadas por método de Brovey y Multiplicación.**

  Para la validación cuantitativa se hará uso de los índices de calidad de imágenes de (Vaiopoulos, 2011) explicados en el marco conceptual, los cuales son: BIAS, Coeficiente

de Correlación (CC), Entropía de la imagen (E) y Error cuadrático medio (RMSE), estos índices serán ejecutados a partir del Software Matlab.

Cabe resaltar que es necesario extraer las escenas NIR fusionadas de las escenas concatenadas fusionadas, y deben ser llevadas a datos tipo Float, dado que es el formato el cualel algoritmo interpreta. Adicionalmente se aclara que este comparativo se debe realizar tanto espacial como espectralmente para poder evidenciar que tanta ganancia espacial se tiene sin disminuir su riqueza espectral.

6.2.3. Cálculo de índices espectrales

Una vez escogida la escena fusionada NIR por el metodo de Multiplicacion se procede a realizar el cálculo de los índices espectrales NDVI, SAVI, DVI, MSAVI2 y BI2; esto se desarrolla a partir del módulo "Raster / Unsupervised / Índices" en Erdas Image .

En primer lugar para el cálculo del NDVI (Figura 17) se escoge la función correspondiente y se ordenan las bandas espectrales de acuerdo a la longitud de onda. En el caso del índice BI2 fue realizado mediante la calculadora raster.

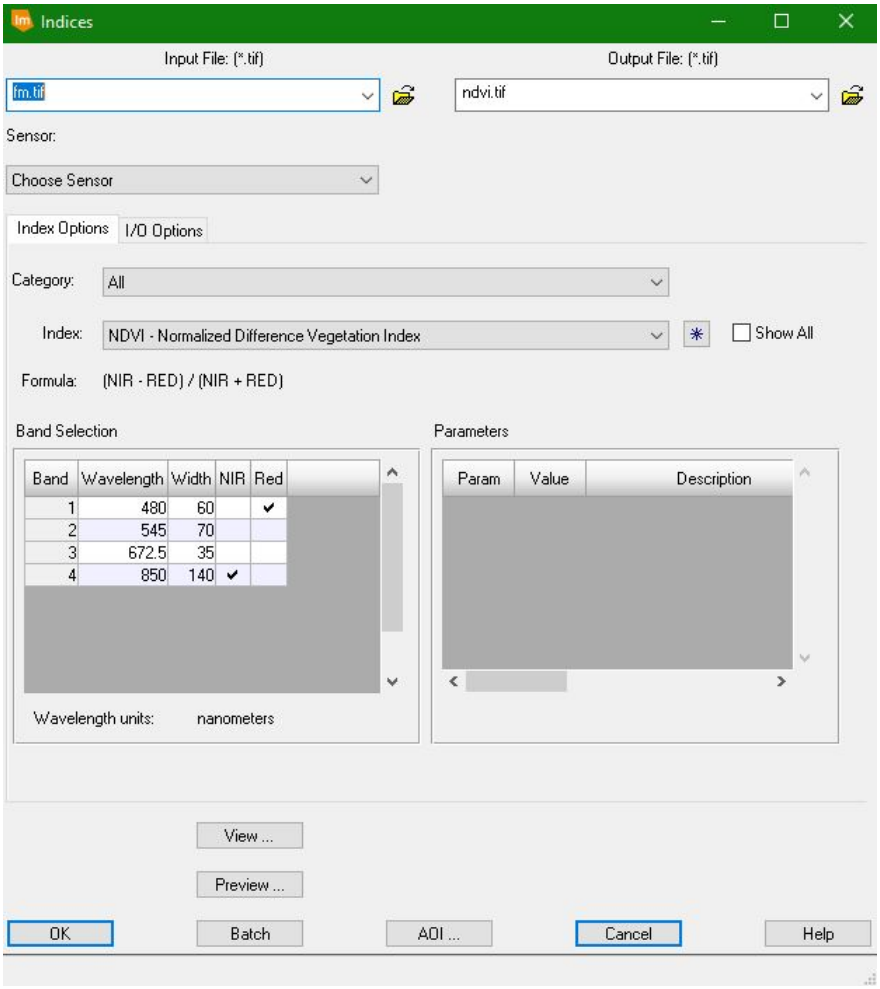


Figura 17: Cálculo de índices espectrales

De manera sucesiva se replica la metodología con los demás índices

6.2.4. Postprocesamiento de los índices espectrales

Ahora bien es importante llevar los resultados de los índices espectrales a un producto que pueda ser implementado como información línea base de guia para el proceso de formación catastral. Para esto se hace uso del Software ArcGIS, donde se ejecutarán procesos de segmentación de las imágenes, reclasificación de las mismas por el método de Slice, extracción de características por atributos, transformación de las escenas de almacenamiento de datos tipo raster a tipo vector (polygon), uniones de polígonos, eliminaciones y depuración de datos.

- **6.2.4.1. Segmentación de índices**

  Se inicia realizando el proceso de Segmentación de los índices, entendiendo que la segmentación o segmentación de desplazamiento medio, es el proceso por medio del cual aquellos valores de píxel que cuenten con las mismas características espectrales serán agrupados por segmentos(valores adquiridos por medio del proceso de fusión de imágenes en los diferentes índices). Para ello es necesario dirigirse al panel de "Arctoolbox / Spatial Analysis Tools / Segmentation and classification / Segment Mean Shift"

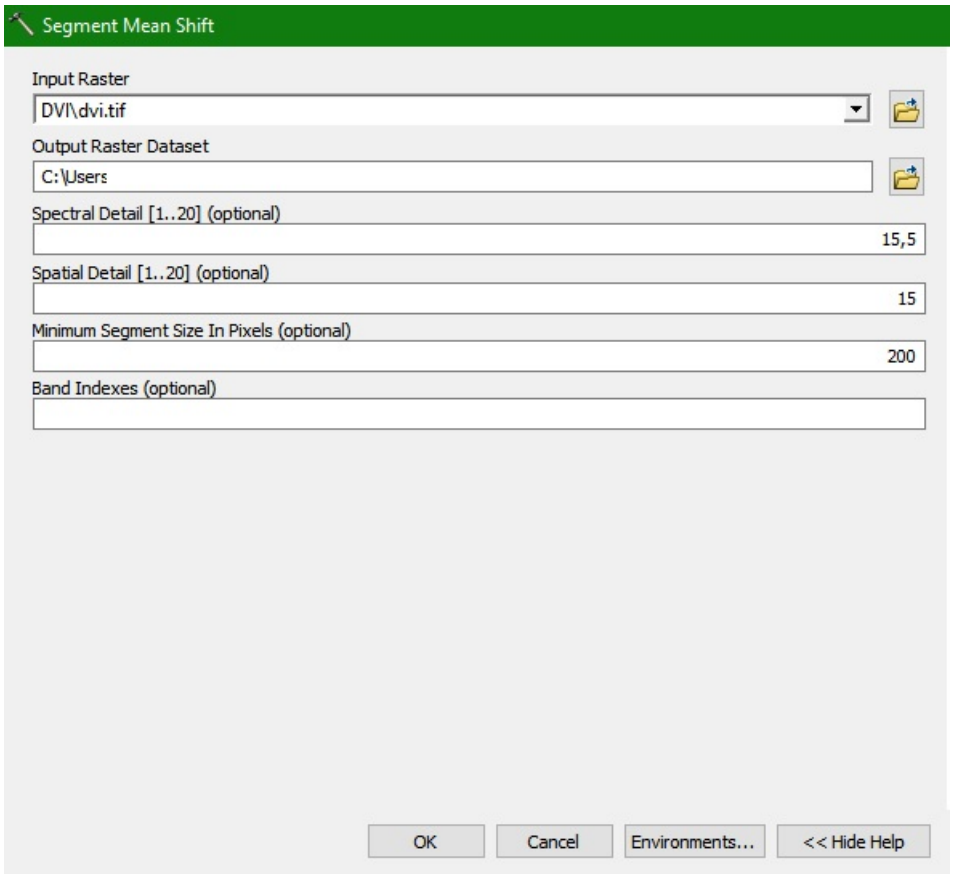


Figura 18: Panel de segmentación

En el panel mostrado en la figura anterior (Figura 18) se ingresa un valor mínimo de 200, para que se simplifique el proceso dada el área de estudio tan extensa y se ayude a que los

procesos posteriores tengan menos perturbaciones.Este proceso debe ser replicado para cada uno de los índices espectrales.

- **6.2.4.2. Reclasificación SLICE**

Posteriormente con cada uno de los rásteres segmentados se procede a realizar la reclasificación por zonas, la cual consiste en reclasificar los valores de entrada, en este caso se designarán para todos 30 zonas, obteniendo así un amplio espectro de análisis. Para ello nos dirigimos a "Arctoolbox / Spatial Analysis Tools / Reclass / Slice", allí como se muestra en la Figura 19 se selecciona el método rupturas naturales, se ingresa el raster segmentado y se especifican 30 zonas de salida.

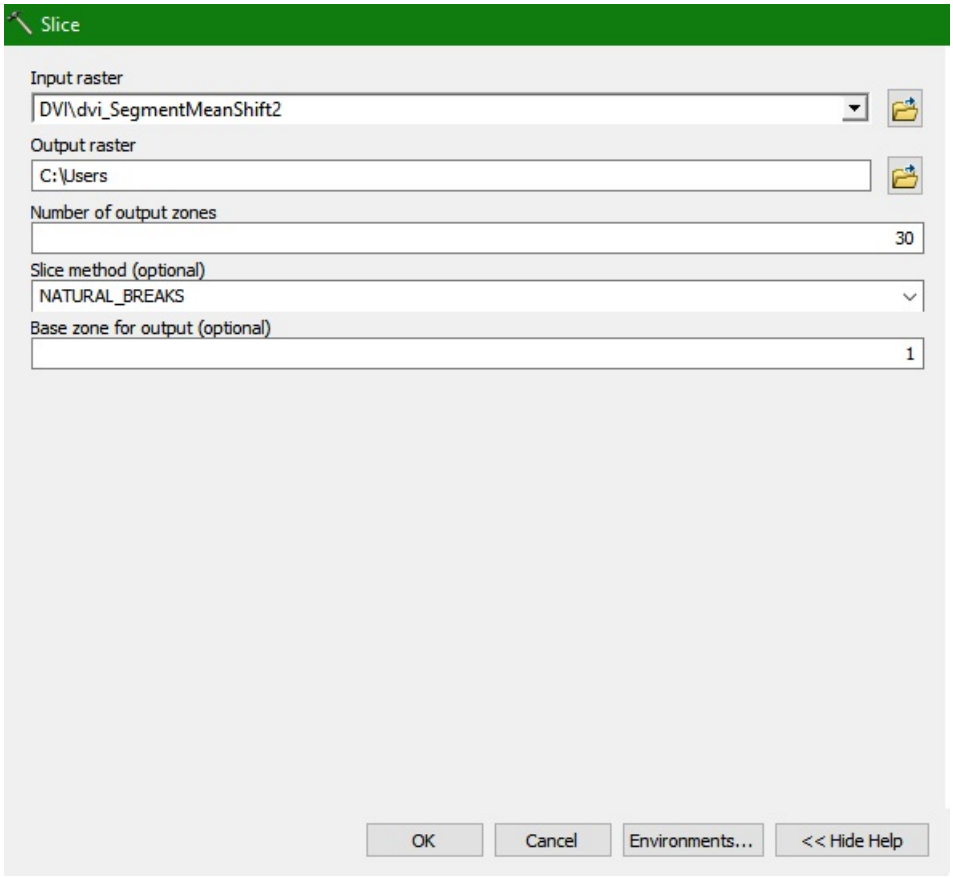


Figura 19: Slice panel

- **6.2.4.3. Extracción por atributos de los rásteres**

La extracción por atributos será un proceso que dependerá de las características particulares de cada índice espectral, recordemos que algunos índices cómo el índice normalizados diferencial de vegetación NDVI presentan valores de -1 a 1 dado que se encuentra normalizado, sin embargo los otros índices presentan valores que pueden ser tanto negativos como positivos y esto se verá reflejado en la reclasificación ejecutada previamente, e influirá en la extracción por atributos de los valores de píxel asociados a las clases asignadas de salida.

Por lo anterior, es necesario dirigirse a cada uno de los rásteres de salida del método de clasificación Slice para evidenciar cuales de ellas corresponden a nuestra cobertura de interés discriminadas espectralmente por la banda infrarroja fusionada dentro del índice. Posteriormente, dichas clases dentro de los atributos serán las que se exporten, dando así un raster únicamente de los pixeles de interés que correspondan a los asentamientos infromales y coberturas con firmas espectrales similares.

Una vez identificadas las clases del 1 al 30 donde se encuentran las coberturas de interés es necesaro dirigirse al panel "Arctoolbox / Spatial Analysis Tools / Extraction / Extract by attributes" que se muestra en la Figura 20, y allí en la cláusula se escribe en SQL las clases donde se encuentra la información de interés y se procesa.

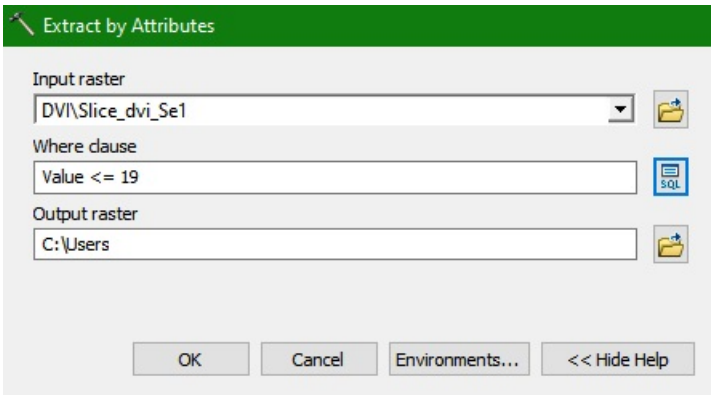


Figura 20: Extracción por atributos del raster

A continuación en el Cuadro 3 se muestran las clases de extracción de cada uno de los índices espectrales:

NDVI	1,2,3,4,5,6
DVI	1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13,14,15,16,17,18,19
SAVI	1,2,3,4,5,6
MSAVI2	8,9,10,11,12,13,14,15,16,17,18,19,20,21,22
BI2	9,10,11,12,13,14,15,16,17,18,19,20,21,22,23,24,25,26,27,28,29,30

Cuadro 3: Clases de extracción por atributos de índices espectrales

- **6.2.4.4. Transformación de las escenas de almacenamiento de datos tipo raster a tipo vector (polygon)**

El objetivo es lograr una articulación de información que sirva para la interoperabilidad de la misma, que sea de fácil acceso y que funcione cómo un insumo base para adelantar procesos catastrales en una atención primaria. Por lo anterior se transforma el tipo de almacenamiento de datos de Raster a Vector para facilitar su operatividad, permitir su carga a cartografías base e incluso ser llevada hasta dispositivos celular en campo en diferentes visualizadores móviles. Para ello es necesario dirigirse al panel "Arctoolbox / Conversion tools / From Raster / Raster To Polygon" , en dicho panel se ingresa el raster de extracción por atributos previamente y se ejecuta.

- **6.2.4.5. Selección de la capa vector que mejor representa los datos**

  La selección de la capa SHP que mejor representa el objeto de estudio será de carácter cualitativo y dependiendo de las características pictórico morfológicas de la escena satelital fusionada en contraste con la capa de polígonos.

  Para lo cual se comparará la combinación en falso color infrarrojo, el índice espectral y el resultado de los polígonos finales del proceso para cada uno, aquel que presente mayor correspondencia será seleccionado.

  Una vez implementado este paso con cada uno de los índices espectrales se hace uso de herramientas como Eliminate y selección por atributos, para la depuración de datos de la capa de polígonos que mejor represente la zona de estudio.

6.3. Fase 3. Validación de los resultados obtenidos

Para la validación se plantean dos procesos, en el primero se realizará una clasificación supervisada con la imagen RGB de mayor resolución espacial. El segundo proceso tiene que ver con una validación en campo, mediante la cual, se podrá verificar si efectivamente las construcciones obtenidas representan la realidad.

6.3.1. Clasificación supervisada

En este primer proceso de validación se realizará una clasificación supervisada con la escena RGB WorldView3 de mayor resolución espacial, con el fin de contrastar la diferencia con los polígonos obtenidos a través de la fusión, básicamente se quiere verificar si realizar el proceso de fusión con el infrarrojo cercano NIR nos genera una ganancia a la hora de caracterizar los polígonos constructivos. Cabe resaltar que para la clasificación supervisada se realizará un postprocesamiento similar al que se realizó después de la aplicación de los índices.

6.3.2. Verificación en campo

Para la verificación en campo se realizará una visita al área de estudio, allí lo que se quiere validar es que los polígonos que se obtuvieron realmente existan en terreno. Esta visita constara de diferentes partes, en primera instancia un acercamiento a los poseedores de los asentamientos informales para la obtención de información sobre las condiciones físicas, jurídicas y fiscales del área. Seguidamente se realizará un registro fotográfico donde se evidencia las tipologías constructivas de la zona de estudio, y si es que existe modernización de materiales; finalmente se revisara la infraestructura de servicios públicos vinculada al proceso de regularización de la propiedad de los bienes informales y se registrará el recorrido en formato GPS para la validación de la exactitud temática y posicional. Adicionalmente, se realizará un acercamiento a la oficina de planeación municipal en la Alcaldía de Sabana de Torres para indagar la evolución del fenómeno analizado en la presente propuesta metodológica.

7. Desarrollo

7.1. Fase 1. Base metodológica

7.1.1. Caracterización de la zona de estudio

El municipio de Sabana de Torres se encuentra ubicado en el Noroeste del departamento de Santander, en el Magdalena Medio Santandereano. Según (IGAC, 2022b) fue elevado a categoría municipal mediante Ordenanza 16 del 29 de noviembre de 1973 de la asamblea departamental de Santander, segregado del territorio de Puerto Wilches, del cual formaba parte como inspección de policía. La cabecera municipal está localizada a los 07°23'43"de latitud norte y 73°29'37"de longitud oeste, a una altura sobre el nivel del mar de 135 m. Dista de Bucaramanga la capital departamental 40 km por vía terrestre. El área municipal es de 1400,617 km^2 y limita al norte con Rionegro, al este con Lebrija, al sur con Girón y Barrancabermeja y al oeste con Puerto Wilches.

La topografía del terreno es plana a ligeramente ondulada y corresponde al valle medio del río Magdalena. Recorren el territorio los ríos Magdalena y Lebrija, al igual que numerosas corrientes menores. Sus tierras se encuentran en el clima cálido, la humedad relativa promedio anual es de 83 % y la temperatura promedio anual es de 27,5°C, siendo marzo el mes de mayor temperatura y octubre el de menor. Con base en los datos del Censo 2018,la población total estimada para el año 2022 es de 35.212 habitantes, de los cuales 24.529 se encuentran en la cabecera y 10.683 en el área rural; el número total de viviendas proyectadas es de 14.225 de las cuales 10.055 se ubican en la cabecera municipal y 4.170 en el área rural; y el total de hogares proyectado es de 11.561 de los cuales 8.108 se encuentran en la cabecera municipal y 3.453 en el área rural; la densidad de población para el año 2022 es de 25,1 habitantes por km^2.

En cuanto a accesibilidad, se une por carretera con Lebrija y Puerto Wilches. Además, dentro de los proyectos de Tercera Generación que se están ejecutando en el país, el municipio se comunica por estas vías (3G) con: Aguachica, Chimichagua, Gamarra, Pailitas, San Martín, Tamalameque; Puerto Boyacá (Boyacá), Caparrapí, Guaduas, Puerto Salgar (Cundinamarca), La Esperanza (Norte de Santander), Barrancabermeja, Puerto Parra y Simacota (Santander). Respecto a la vía férrea se encuentra en el transecto que comunica desde Chiriguaná (Cesar) hasta La Dorada (Caldas), transitando por los departamentos de Cesar, Antioquia, Santander y Caldas; perteneciente al contrato de obra Bogotá - Belencito - Dorada - Chiriguaná. Adicionalmente, en sus vías se encuentra un peaje.

La población tiene acceso a los servicios públicos domiciliarios de energía eléctrica con 11.228 usuarios y una cobertura total de 94,19 %, gas natural con 5693 abonados y una cobertura total de 92.69 % y telefonía pública con 1.434 abonados y una cobertura total de 26,1 %. En el sector de la construcción, para el año 2019 el municipio registra 2.764 m^2 aprobados para edificar.

En cuanto a normativa en el Plan de Desarrollo 2020-2023 MÁS POR SABANA se encontró que el municipio adoptó el Esquema de Ordenamiento Territorial, mediante Acuerdo 015 del 25 de mayo del año 2004 y en el año 2015 adoptó la revisión excepcional de norma urbanística del Esquema de Ordenamiento Territorial por medio del Acuerdo 033 de 2015, el cual actualmente es la norma por la cual se rige el municipio. Sin embargo, el 27 de septiembre de 2022 se expidió el Decreto 247: Por el cual se viabiliza, prioriza y aprueba el proyecto de inversión denominado "Revisión general del esquema de ordenamiento territorial EOT, y transición a plan básico de

ordenamiento territorial, PBOT, en el municipio Sabana de Torres Santander", identificado con código BPIN 2022686550051, - SGR, financiado con recursos provenientes del sistema general de regalías (SGR), en el marco de la ley 2056 de 2020 y el decreto reglamentario 1821 de 2020. Esto es importante ya que el municipio tendrá que hacer los estudios correspondientes para formular su nuevo PBOT, por lo cual , la metodología presentada puede ser de utilidad.

Por otra parte, es importarte recalcar que según los datos suministrados por la página de Catastro Multipropósito del Instituto Geográfico Agustín Codazzi, la actualización catastral en el municipio presenta la siguiente situación:

Vigencia Rural	2007
Vigencia Urbana	2008
Predios Área Rural	3,500
Predios Área Urbana	6,471
Total Predios	9,971
Área de terreno (ha) Rural	150,535.66
Área de terreno (ha) Urbana	280.71
Área total (ha)	150,816.37

Cuadro 4: Situación de la Actualización Catastral

A partir del cuadro anterior (Cuadro 4) se puede evidenciar que el municipio no se actualiza catastralmente hace aproximadamente 15 años, esto significa que información línea base obtenida mediante métodos indirectos como lo que se propone mediante la metodología trabajada en el presente documento sirve para que el municipio cuente con una actualización cartográfica urbana y rural.

Teniendo una caracterización general del municipio de Sabana de Torres, se procede a definir la zona de estudio, la cual se sustenta en los mapas realizados en el EOT Acuerdo 033 de 2015, en los cuales se identifican los asentamientos informales a trabajar en la metodología, a continuación observamos el Mapa Topográfico Urbano:

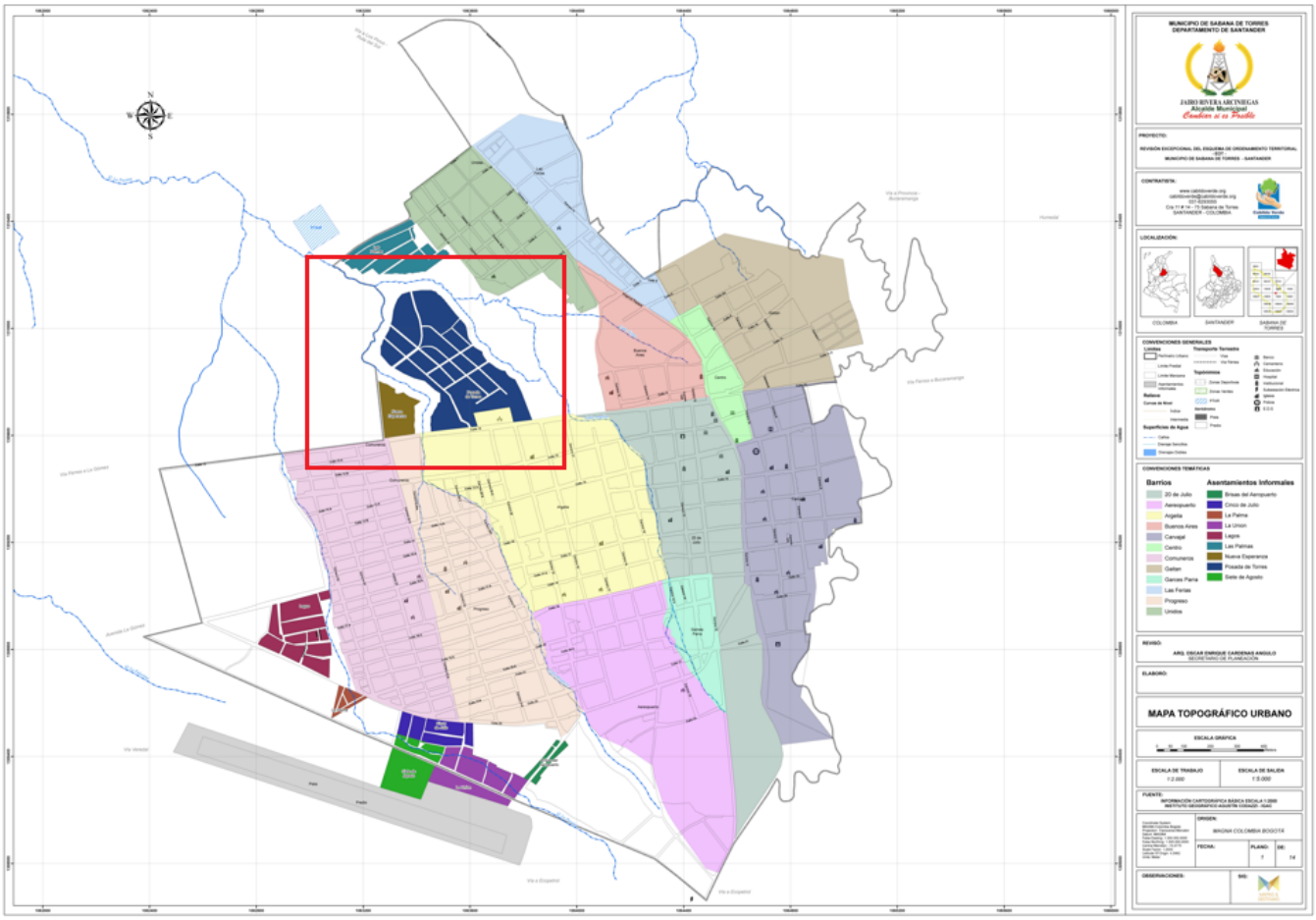


Figura 21: Mapa Topográfico Urbano

En la Figura 21 el área que demarca el recuadro rojo corresponde a la zona de estudio, en ella se encuentran dos asentamientos informales: El de color azul se llama Posada de Torres y el de color café se llama Nueva Esperanza. Basado en la interpretación de los demás Mapas generados en el EOT, se puede definir las siguientes características de la zona de estudio: En cuanto a la geología tiene unidad geológica Qt2 terrazas aluviales nivel 2, la pendiente se encuentra entre: A nivel y ligeramente inclinada, tiene amenaza múltiple nula y no presenta condición de riesgo. En el mapa de uso actual se define como Asentamientos informales y en el mapa de tratamientos urbanísticos se define como Mejoramiento integral, el cual, rige diferentes actuaciones para la regularización de los asentamientos informales, finalmente su actividad económica es de tipo residencial.

Siguiendo con lo anterior, ahora se analizará la información geográfica (Shapes) que tiene el instituto geográfico Agustín Codazzi para nuestra zona de estudio, es de resaltar que esta información será utilizada para comparar los resultados obtenidos después de haber aplicado la metodología propuesta. A continuación se relaciona un mapa creado a partir de dicha información:

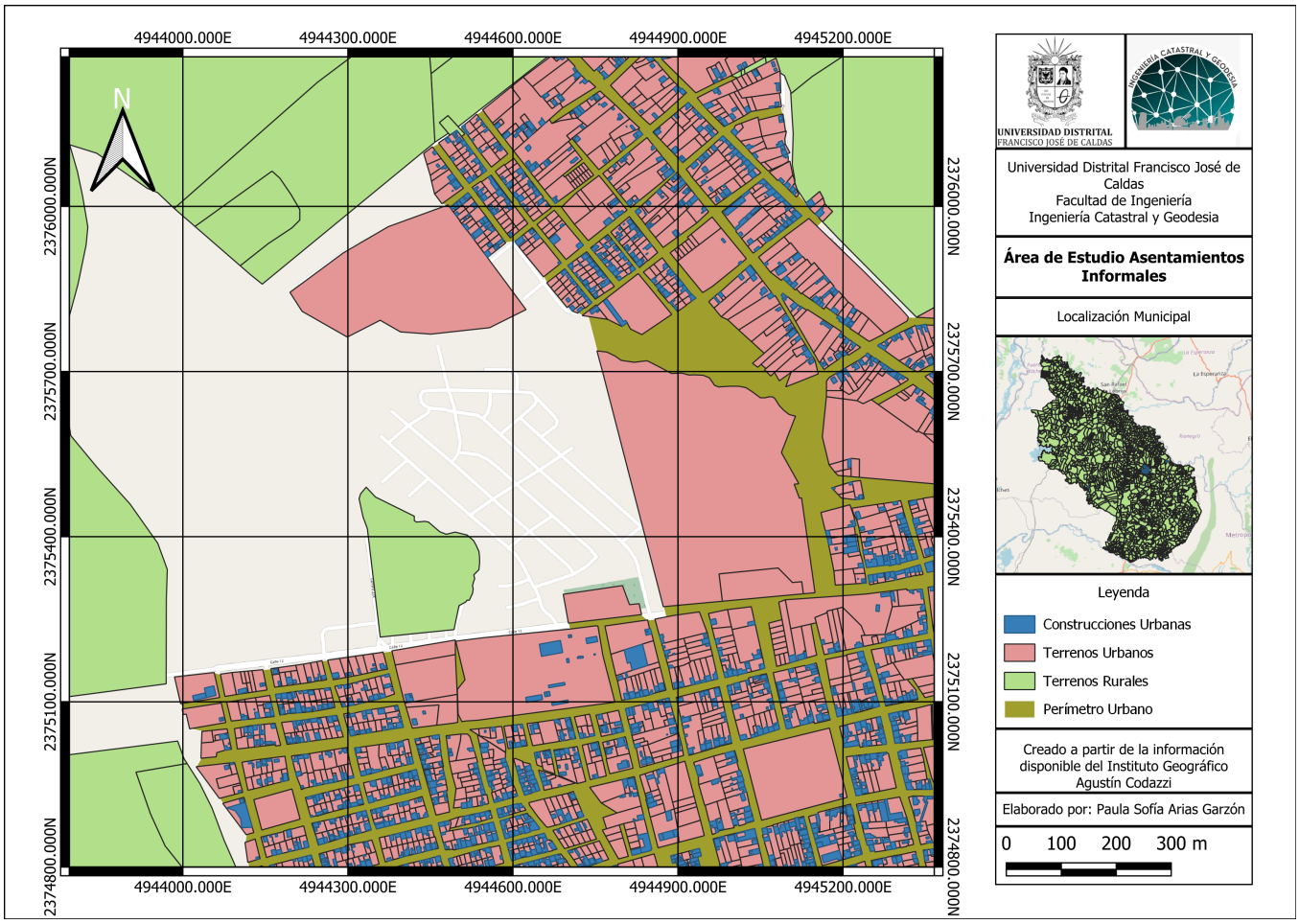


Figura 22: Área de Estudio

En el mapa anterior (Figura 22), se puede observar que efectivamente el Instituto Geográfico Agustín Codazzi como máxima entidad catastral no cuenta con información a nivel constructivo de los dos asentamientos informales a trabajar en este documento. Es de resaltar que el asentamiento informal Nueva Esperanza por lo menos se encuentra definido a nivel perimetral, aunque, se encuentra dentro de los limites rurales del municipio, algo que se contradice con la información presentada en el EOT donde esta área ya se considera dentro del límite urbano. Por otro lado, vemos que el asentamiento informal Posada de Torres no cuenta con ningún tipo de información, este problema se da debido a que como se nombraba anteriormente la Actualización catastral para este municipio tiene vigencia 2007- 2008.

7.1.2. Insumos requeridos

Los insumos correspondientes a las imágenes satelitales tienen fechas de diciembre del año 2018, la imagen de alta resolución espacial es del satélite WorldView 3, esta imagen fue una donación por criterio académico de la empresa Maxar Technologies Inc., cuenta solamente con las bandas RGB y una resolución espacial de 0.3 metros dada por un preprocesamiento realizado directamente por la empresa, también dentro de este preprocesamiento se realizaron las respectivas correcciones para que la imagen estuviera lista para procesar. La imagen multiespectral es del satélite PlanetScope, la cual cuenta con la banda del infrarrojo cercano NIR y

una resolución espacial de 3 metros, al igual que la imagen anterior ya venía con las respectivas correcciones tanto atmosféricas como la ortocorrección, cabe resaltar que ambas imágenes son del municipio de Sabana de Torres. En cuanto a los softwares las licencias fueron de tipo académico.

7.2. Fase 2. Implementación metodológica

7.2.1. Preprocesamiento

- **7.2.1.1. Despliegue de las Imágenes**

  En el software Erdas se abre el archivo de formato ".tif" de cada escena obteniendo su visualización:



Figura 23: Escena satelital WorldView 3

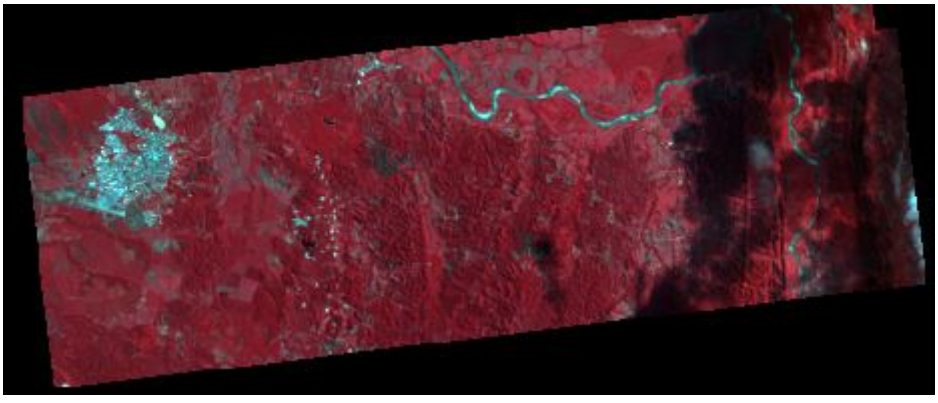


Figura 24: Escena satelital PlanetScope

En la Figura 23 se observa que la escena WorldView 3 se despliega en color verdadero por defecto mientras que en la Figura 24 se observa que la escena PlanetScope se despliega

en falso color infrarrojo, esto dado a que cómo bien se explicó con anterioridad la escena Worldview 3 para el caso a desarrollar solo cuenta con bandas RGB (Rojo-Verde-Azul) y la escena PlanetScope con RGB-NIR (Rojo-Verde-Azul-Infrarrojo cercano).

Del comando "Metadata" se obtiene la siguiente información de la escena satelital World-View 3:

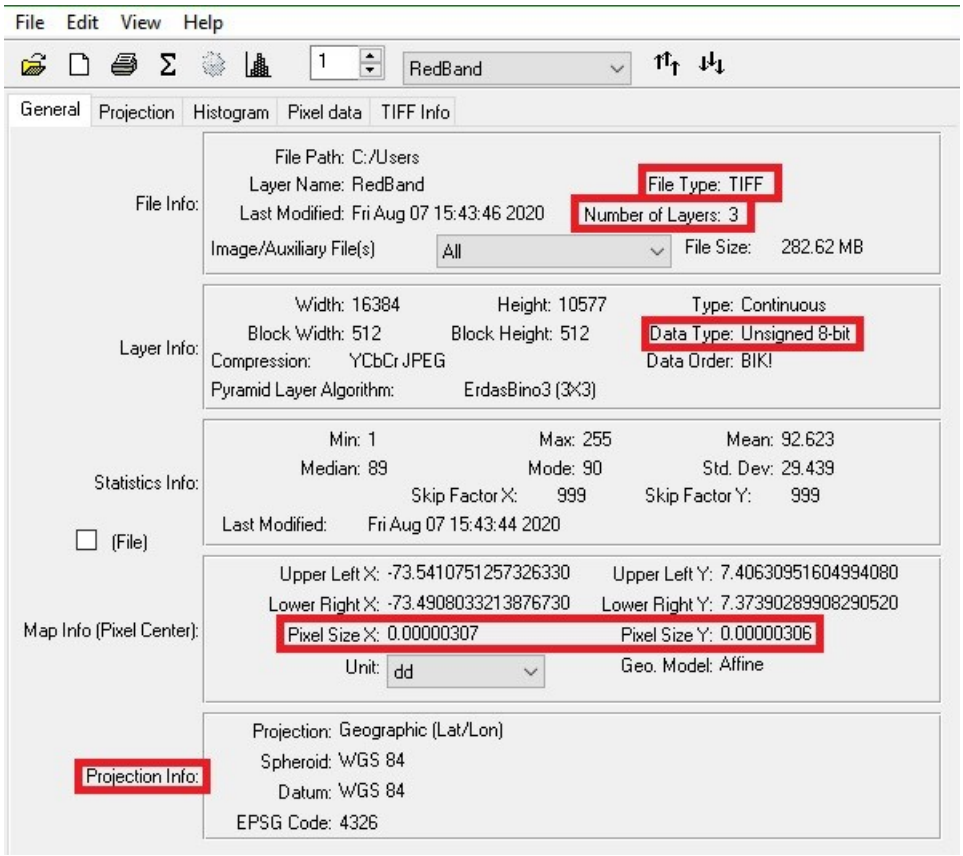


Figura 25: Metadata escena satelital WorldView 3

Se puede observar en la Figura 25 que la escena WorldView 3 cuenta con tres bandas espectrales (Number of Layers:3), su formato es tipo TIFF (File Type: TIFF), su resolución radiométrica es de 8 bits (Data Type: Unsigned 8-bit), su resolución espacial es de 0.3 metros (Pixel Size: 0.000003) y su proyección es una geográfica WGS 84 correspondiente al código EPSG 4326, de ahí el por qué la medida de 0.3 metros de resolución espacial se encuentra sin reproyección.

Del comando "Metadata" se obtiene la siguiente información de la escena satelital Pla-netScope:

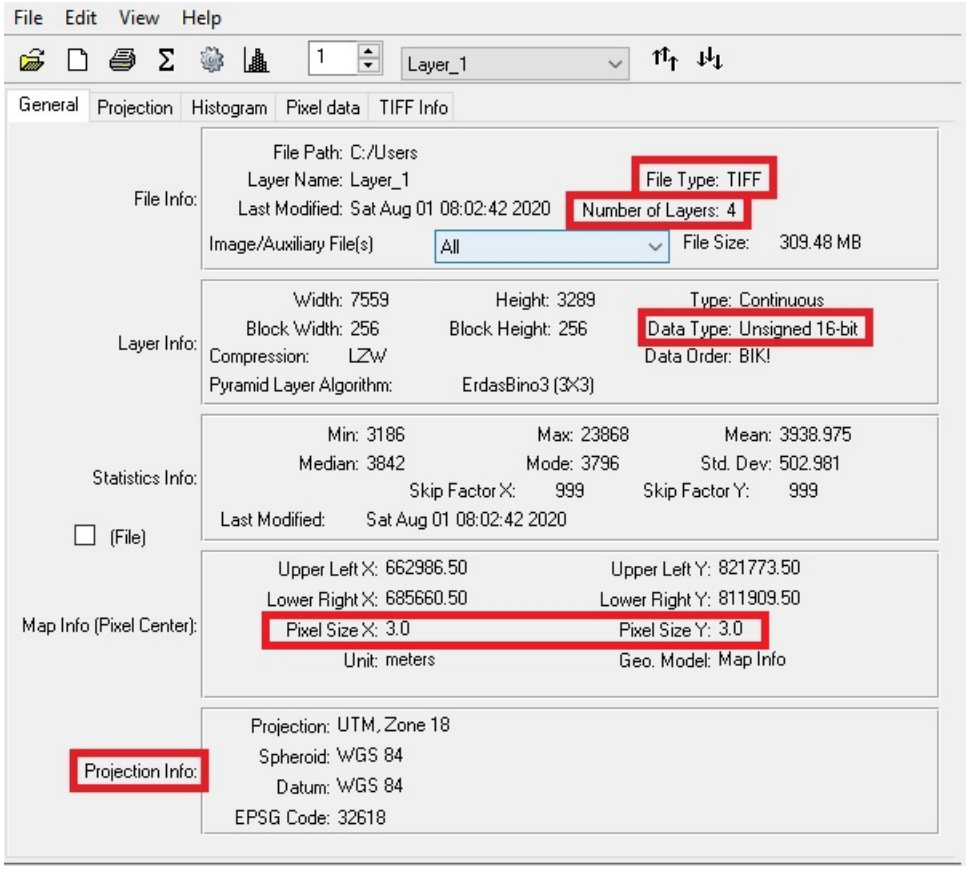


Figura 26: Metadata escena Satelital PlanetScope

Con la figura anterior (Figura 26) se valida que la escena PlanetScope cuenta con 4 bandas espectrales (Number of Layers:4), su formato es tipo TIFF (File Type: TIFF), se resolución radiométrica es de 16 bits (Data Type: Unsigned 16-bit), su resolución espacial es de 3.0 metros (Pixel Size: 3.0) y su proyección es UTM zona 18 norte correspondiente al código EPSG 32618.

- **7.2.1.2. Cambio de coordenadas**

Como resultado del proceso de cambio de coordenadas de la escena WorldView se obtiene la Figura 27 donde se confirma que efectivamente el sistema de coordenadas corresponde al EPSG 32618 UTM Zona 18 Norte:

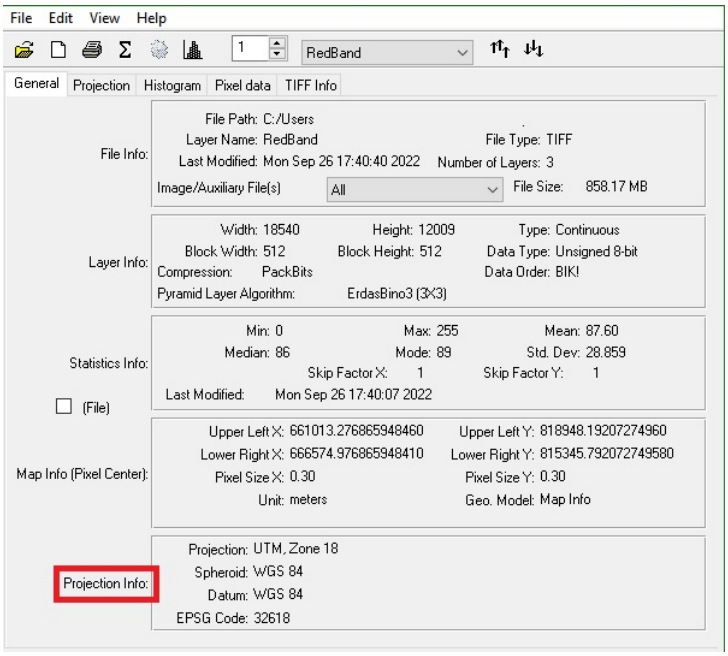


Figura 27: Verificación del cambio de sistema de coordenadas Escena Satelital Worldview 3

- **7.2.1.3. Recorte del área de estudio**

  Una vez realizados los recortes correspondientes a la zona de estudio se obtiene como resultado:



Figura 28: Recorte escena satelital WorldView 3

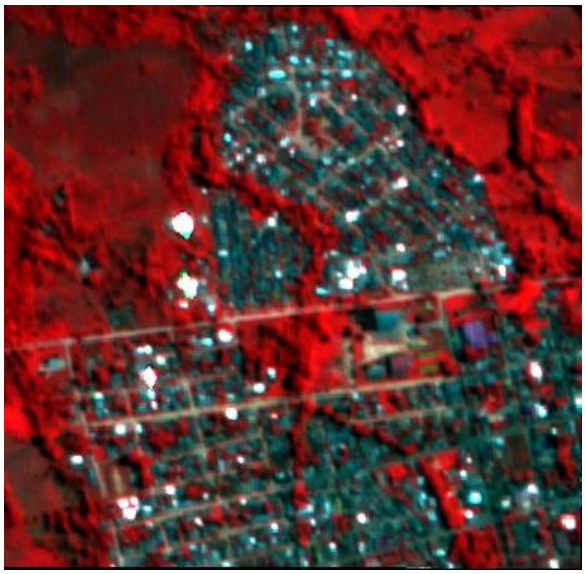


Figura 29: Recorte escena satelital PlanetScope

Como se puede observar en las Figuras 28 y 29 ambos recortes quedaron con un área igual, esto será muy importante a la hora de realizar los demás procesos; dado que es indispensable la superposición y concordancia espacial entre las mismas. En el recorte se observan los dos asentamientos informales a trabajar correspondientes a Posada de Torres y Nueva Esperanza, también se observa el cementerio de Sabana de Torres que se ubica en la parte inferior del asentamiento Posada de Torres, y se abarca una parte urbana del municipio.

- **6.2.1.3. Re-Escalamiento de resolución radiométrica**

El resultado de re-escalar de 16 a 8 bits la escena PlanetScope se observa a continuación:

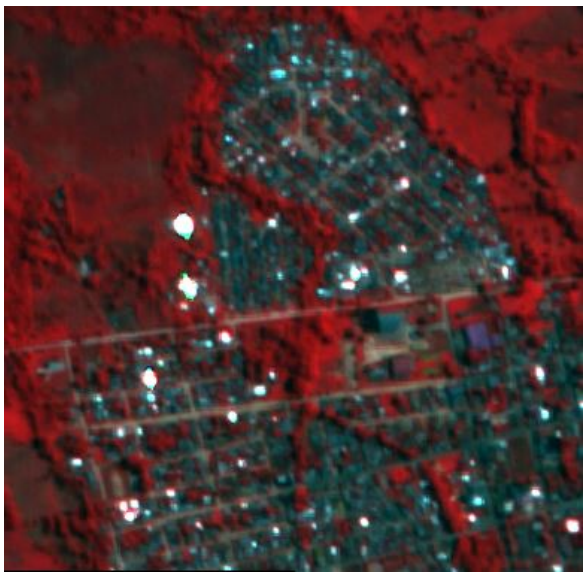


Figura 30: Escena satelital PlanetScope 16 bits

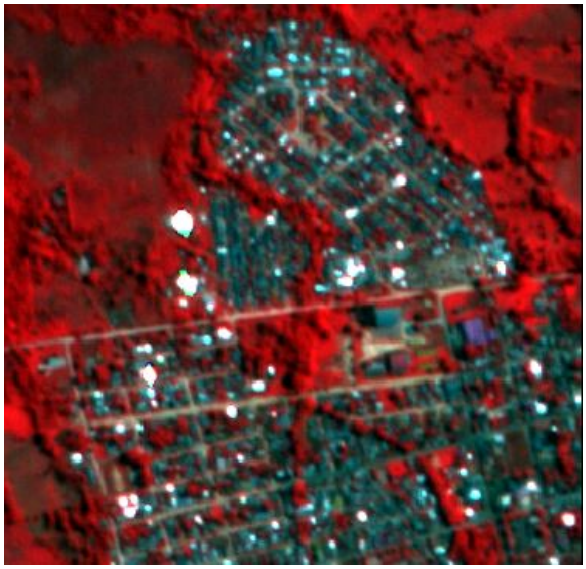


Figura 31: Escena satelital PlanetScope 8 bits

Comparando la Figura 30 con la Figura 31 se observa que la escena a 8 bits presenta mayores brillos y tonos oscuros de una forma más clara, lo cual da a entender que al reducir la cantidad de bits, de manera directa se redujo la cantidad de tonalidades que podía tener la escena, es decir, se pasan de 2 elevado a 16 niveles de grises, es decir, 65536 tonalidades a 2 elevado a la 8 tonalidades o niveles digitales, es decir 256 de 0 a 255 tonalidades.

- **7.2.1.4. Resampleo de dimensiones de píxel de 3 a 0.3 metros**

Una vez procesado el resampleo de píxel se obtiene la siguiente escena PlanetScope:

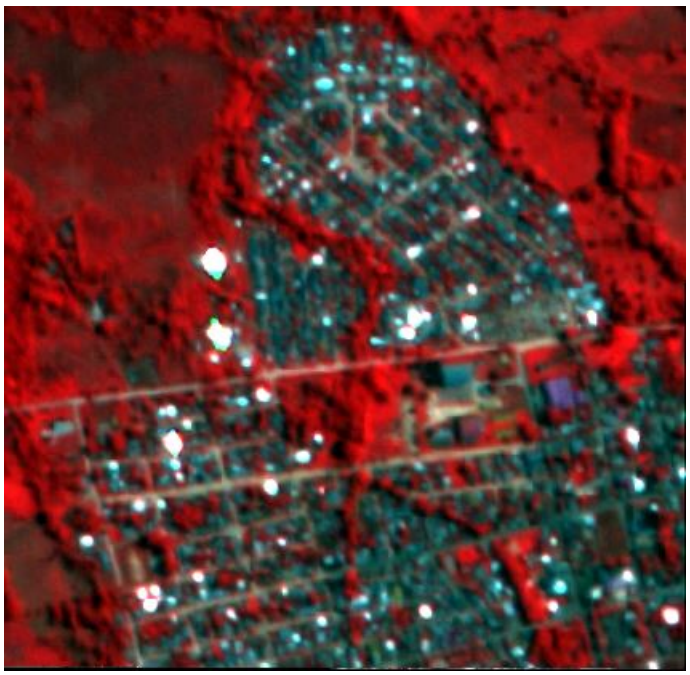


Figura 32: Escena satelital PlanetScope Resampleada

Ahora comparando la Figura 31 con la Figura 32 se observa que la escena satelital a nivel visual se aclara un poco, pero sus características radiométricas y espectrales se mantienen, sin embargo a pesar de que su resolución espacial sigue siendo de 3 metros de píxel, su representación estará dada por 100 pixeles del mismo valor para cada uno de ellos, 10 pixeles por cada lado. Para validar lo anterior en la Figura 33 se muestra el metadata de la escena:

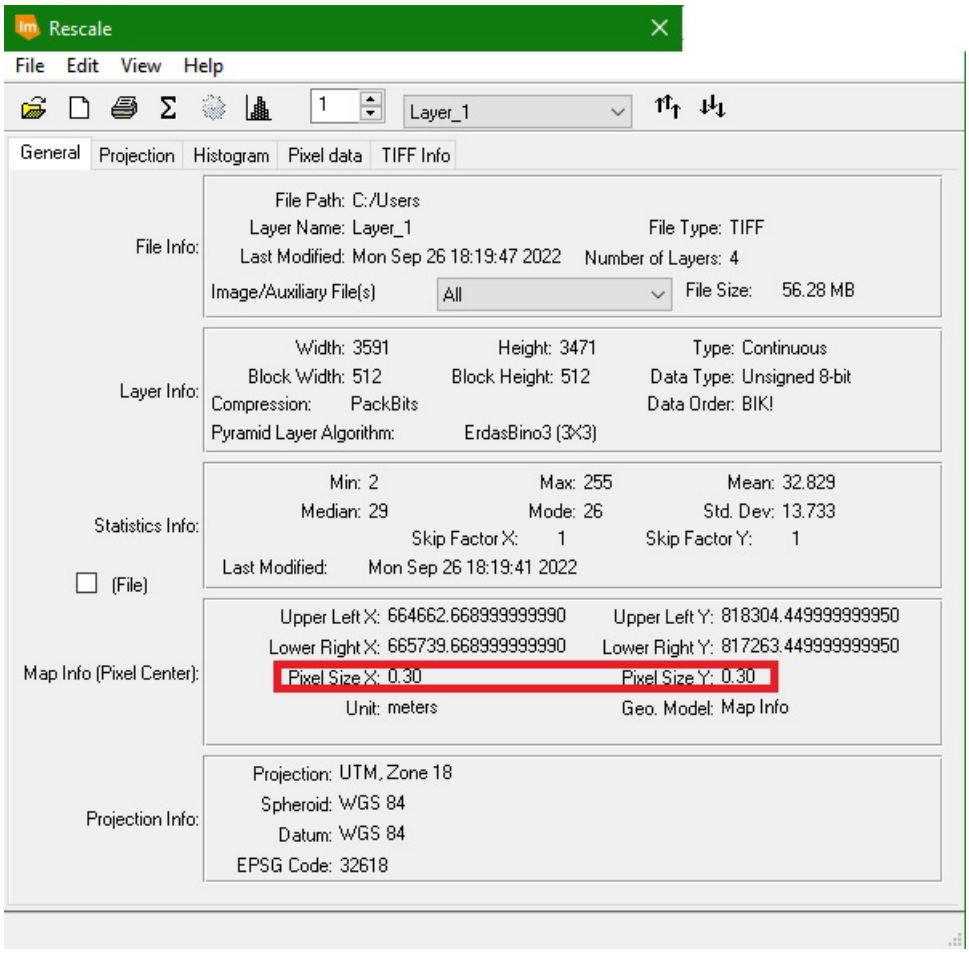


Figura 33: Verificación escena Satelital PlanetScope Resampleada

- **7.2.1.5. Empalme entre píxeles**

  El resultado del empalme entre píxeles se presenta a continuación:



Figura 34: Empalme entre píxeles

Como se puede observar en la Figura 34, el píxel del lado derecho correspondiente a la escena satelital WorldView 3 empalma correctamente por el lado con 10 pixeles de la escena satelital PlanetScope, cumpliendo así la superposición para los procesos posteriores

de fusión de imágenes e incrementando la exactitud temática y posicional del resultado final.

- **7.2.1.6. Creación de la escena falsa pancromática**

  Una vez ejecutada la ecuación correspondiente se obtiene la escena falsa pancromática:



Figura 35: Escena Falsa Pancromática

El resultado mostrado en la Figura 35 es una aproximación sintética, la cual funciona homólogamente dentro del proceso de fusión de imágenes, en otras palabras, si bien es cierto se sabe que es requerida una banda pancromática para fusionar imágenes, una solución a ello es la propuesta escena sintética falsa. Muchos autores argumentan que no es posible ejecutar fusiones de no contar con dicha información, entorpeciendo procesos investigativos y frenando el desarrollo de metodologías como la planteada. Cabe resaltar que existen diferentes formas de obtener dicha escena falsa pancromática como por ejemplo: donde se toma la componente principal 1 del análisis de componentes principales como la escena pancromática; algunos otros emplean la transformación IHS (Intensidad-Tono-Saturación) siendo la intensidad la falsa pancromática a emplear, o como es en este caso que se generó a partir de la ecuación propuesta con las bandas del RGB.

- **7.2.1.7. Concatenación RGB WorldView 3 - NIR PlanetScope como escena Multiespectral para posterior fusión.**

  Como resultado del proceso de Stack se obtiene la escena RGB NIR que se presenta en combinación falso color infrarrojo en la Figura 36, donde se evidencia que en el cañón del rojo se encuentra la escena NIR de menor resolución espacial y en G y B las bandas R y G de Worldview dando mayor detalle.

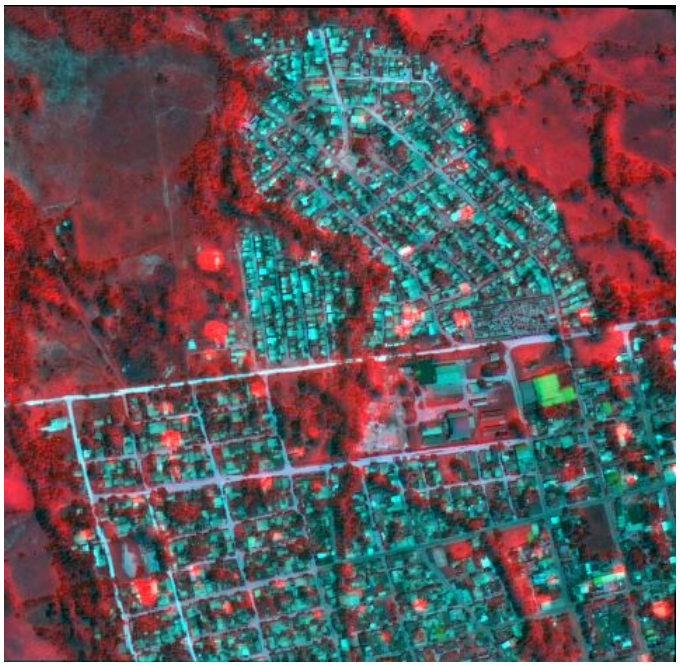


Figura 36: Escena RGB Worldview - NIR PlanetScope

7.2.2. Fusión de imágenes

- **7.2.2.1. Fusión de imágenes por Método de Brovey**

  En la Figura 37 se muestra el resultado de la fusión por el algoritmo de brovey, del cual se obtiene la siguiente escena fusionada:

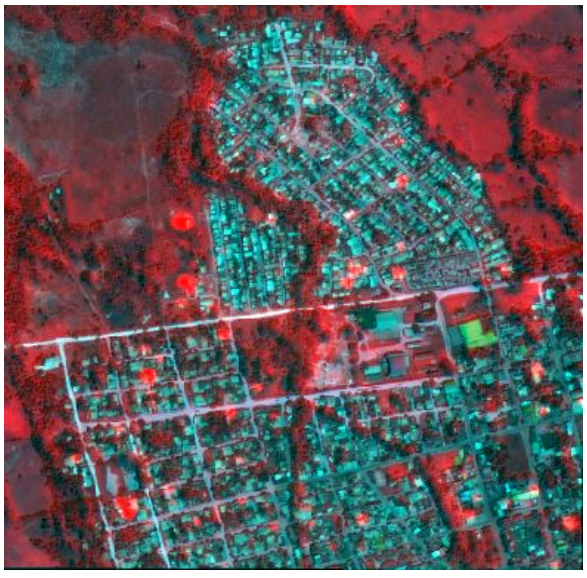


Figura 37: Fusión de imágenes por Método de Brovey (Menor detalle)



Figura 38: Fusión de imágenes por Método de Brovey (Mayor detalle)

En la Figura 38 se observa como el nivel de detalle mejora drásticamente, a simple vista

se pueden definir las siguientes coberturas: polígonos constructivos, vegetación y suelo desnudo que en este caso son las carreteras sin pavimentar. En el siguiente paso se evalúa la fusión de manera cualitativa y cuantitativa.

- **7.2.2.2. Fusión de imágenes por Método de Multiplicación**

  En la Figura 39 se muestra el resultado de la fusión por el algoritmo de multiplicación, del cual se obtiene la siguiente escena fusionada:

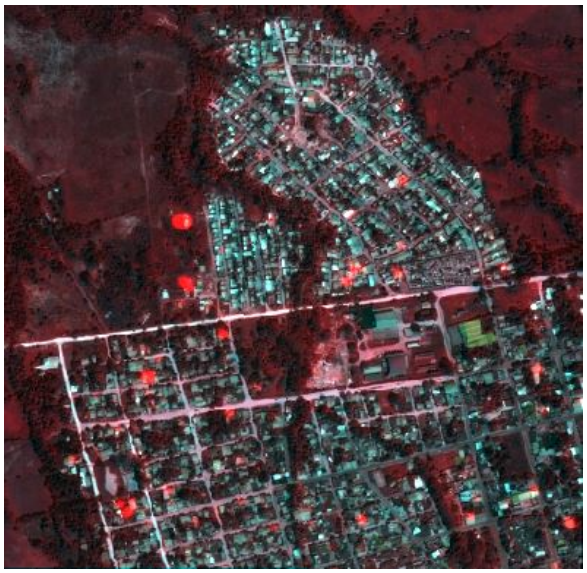


Figura 39: Fusión de imágenes por Método de Multiplicación (Menor detalle)



Figura 40: Fusión de imágenes por Método de Multiplicación (Mayor detalle)

Al igual que la fusión anterior, se observa en la Figura 40 como el nivel de detalle mejora drásticamente, a simple vista se pueden definir las siguientes coberturas: polígonos constructivos, vegetación y suelo desnudo que en este caso son las carreteras sin pavimentar. En el siguiente paso se evalúa la fusión de manera cualitativa y cuantitativa.

- **7.2.2.3.Comparación cualitativa de las escenas NIR fusionadas por método de Brovey y Multiplicación**

  Para la comparación se observa a continuación la banda NIR (infrarrojo cercano) de la escena original (Figuras 41 y 44), de la fusión por método de Brovey (Figuras 42 y 45) y de la fusión por método de Multiplicación (Figuras 43 y 46):



Figura 41: NIR ORIGINAL



Figura 42: NIR Brovey



Figura 43: NIR Multiplicación

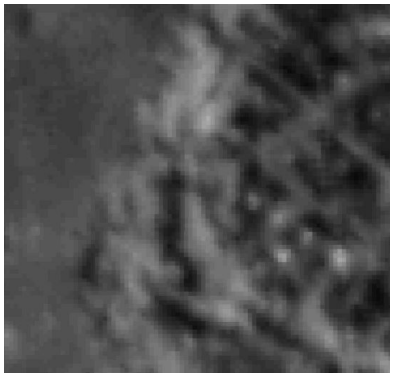


Figura 44: NIR ORIGINAL

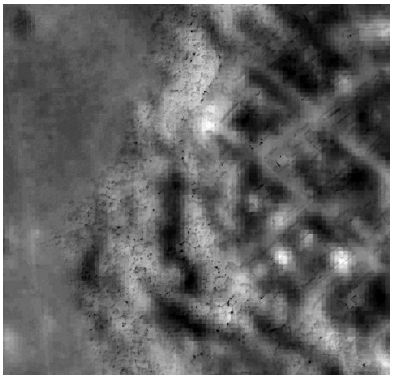


Figura 45: NIR Brovey



Figura 46: NIR Multiplicación

De lo anterior se hace evidente que la escena Brovey presenta características similares a la escena original, lo cual en un principio puede ser bueno porque conserva características propias de la imagen original, algo que debe suceder cuando se realiza fusión de imágenes, sin embargo no refleja mayor adquisición de riqueza espacial, lo cual significa que el resultado no es del todo bueno o simplemente el objetivo de la fusión no se cumplió; por su lado la escena fusionada por el método de multiplicación presenta una adquisición sustancial de carácter visual de ganancia espacial, definiendo mejor los patrones de las coberturas, sin embargo no se sabe de manera cuantitativa que tanta riqueza espectral adquirió, por lo cual, es necesario realizar el análisis cuantitativo a partir de los índices de calidad de imágenes. Para analizar estas fusiones desde la comparación con la imagen original, se utiliza la herramienta Inquire para obtener los siguientes lut value:

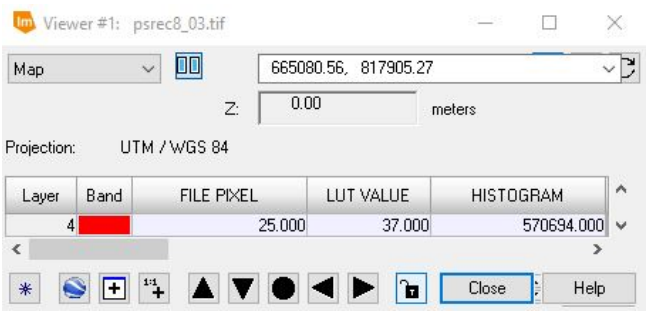


Figura 47: Lut Value ORIGINAL

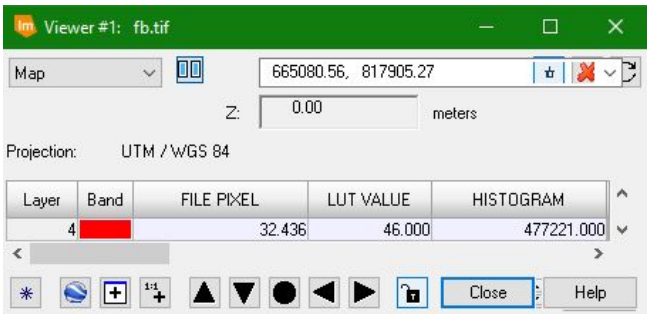


Figura 48: Lut Value Brovey

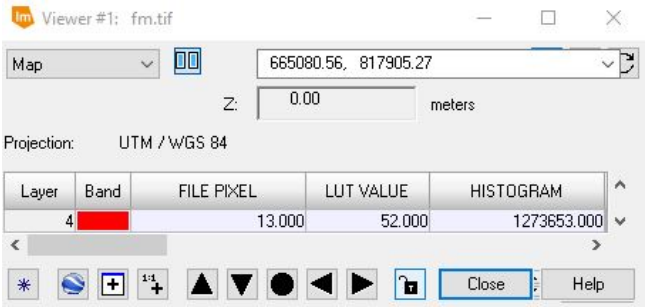


Figura 49: Lut Value Multiplicación

Se puede evidenciar que el lut value de la imagen original (Figura 47) es de 37, si se compara con el lut value para la fusión por Brovey (Figura 48) que es 46 se obtiene una variabilidad de 9, ahora si se compara con el lut value para la fusión por Multiplicación (Figura 49) que es 52 se obtiene una variabilidad de 15. Como se puede evidenciar la variabilidad entre la imagen original y las fusiones es baja, aspecto importante a recalcar, ya que se resalta el hecho de que las fusiones deben conservar características de la imagen original. Sin embargo el método de Brovey refleja menos variabilidad con respecto a la imagen original, tal vez por ello su parecido visualmente.

- **7.2.2.4.Comparación cuantitativa de las escenas NIR fusionadas por método de Brovey y Multiplicación.**

  En el Cuadro 5 se presentan los resultados del proceso de comparación cuantitativa entre la NIR sin fusionar y las NIR fusionadas, con el objetivo de evaluar la riqueza espectral que se ganó:

Índice	Resultado Brovey	Resultado Multiplicación	Valor Teórico
BIAS	-0.238	0,544	0
CC	0.963	0.585	1
E	0,007	0,008	0,006
RMSE	7,983	18,822	0

Cuadro 5: Índices de calidad de imágenes - Adquisición de riqueza espectral.

Por otra parte, en el Cuadro 6 se presentan los resultados del proceso de comparación cuantitativa entre la Falsa pancromática que es solo una banda y las NIR fusionadas, con

el objetivo de evaluar la riqueza espacial que se ganó:

Índice	Resultado Brovey	Resultado Multiplicación	Valor Teórico
BIAS	0.610	0,856	0
CC	0.027	0.716	1
E	0,007	0,008	0,003
RMSE	71,061	92,138	0

Cuadro 6: Índices de calidad de imágenes - Adquisición de riqueza espacial.

Tras revisar cuantitativamente las escenas fusionadas se destaca que se obtuvo una ganancia espectral entre el 58,5 % al 96,3 % para la escena fusionada por método de Multiplicación y Brovey respectivamente; por otro lado de la riqueza espacial se menciona que el método de Brovey no dio los resultados esperados, sin embargo se obtiene un 71,6 % de ganancia espacial por el método de multiplicación. Analizando esto se concluye que la fusión por método de multiplicación adquiere tanto riqueza espectral como espacial, por ello se elige esta escena para la aplicación de los índices.

7.2.3. Cálculo de índices espectrales

Los resultados del cálculo de los índices espectrales en escala de grises se muestran a continuación:

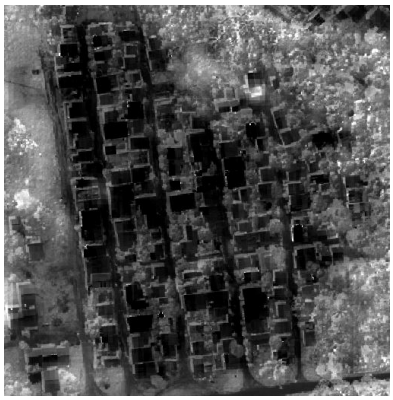


Figura 50: EG NDVI

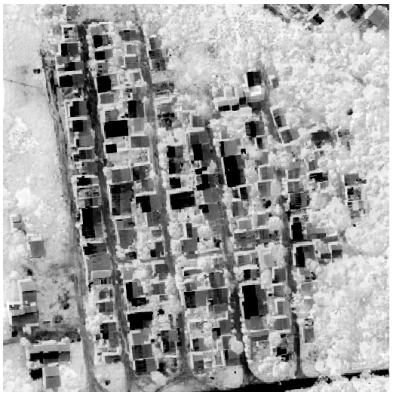


Figura 51: EG DVI

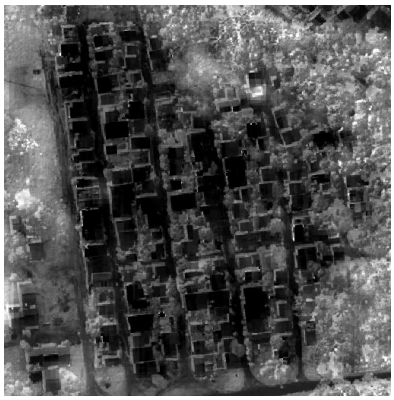


Figura 52: EG SAVI

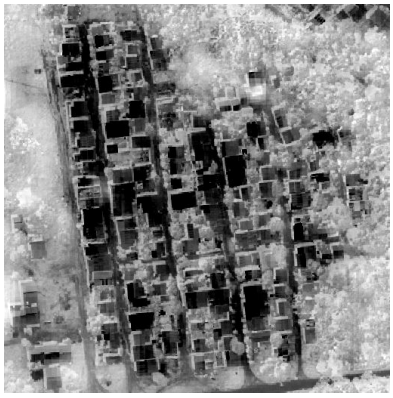


Figura 53: EG MSAVI2



Figura 54: EG BI2

Otra visualización de los índices espectrales en paleta de colores naranja, verde y azul:

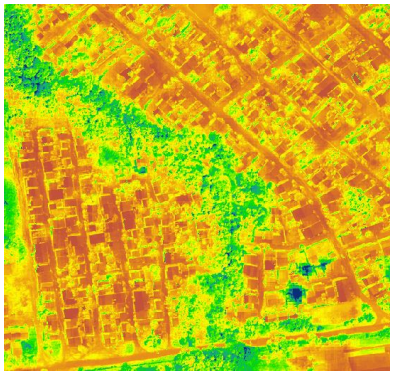


Figura 55: NDVI

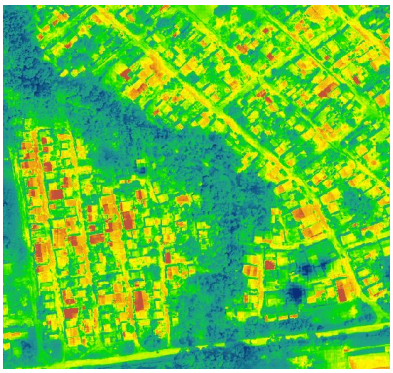


Figura 56: DVI

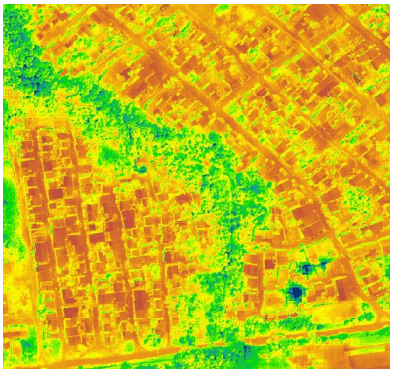


Figura 57: SAVI

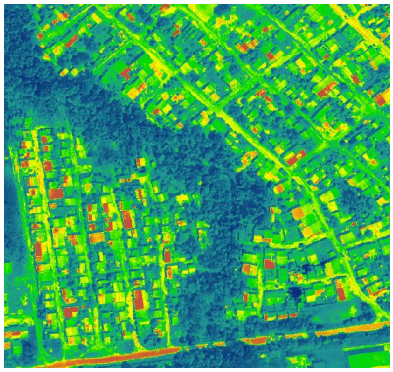


Figura 58: MSAVI2

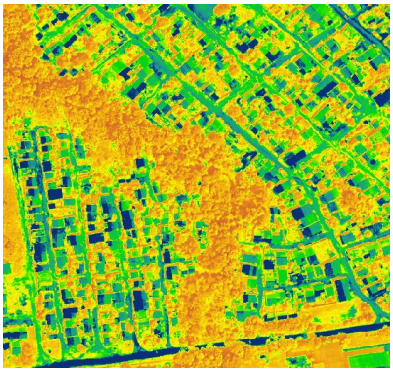


Figura 59: BI2

Es importante recalcar que la mayoría de estos índices espectrales son para detectar vegetación, su aplicación en cuanto a la caracterización de asentamientos informales se da por las características constructivas de estos mismos, ya que, es muy común que este tipo de asentamientos se de en zonas con alta cantidad de vegetación, siendo los mismos poseedores los que se van abriendo paso dentro de ella para construir sus viviendas y van generando los espacios públicos como las carreteras, igualmente estos índices fueron aplicados porque según la

información encontrada en el Instituto Geográfico Agustín Codazzi sobre el área de estudio, el asentamiento informal Nueva Esperanza se contemplaba dentro del suelo rural del municipio y del asentamiento Posada de Torres no se contaba con información, de lo cual se puede interpretar que las características de esta área no estaban listas para considerarse como suelo urbano o de expansión urbana, fue después que con el EOT se reconocieron como asentamientos informales y el perímetro urbano del municipio los acogió dentro de él para empezar con el tratamiento de mejoramiento integral. Siguiendo con lo anterior, la idea es lograr contrarrestar donde hay presencia de vegetación y donde no, ya que, lo más probable es que donde no hay vegetación o hay poca, existan construcciones. También, estos índices se aplicaron debido a la gran variedad de usos que se lograron identificar en el estado del arte.

Ahora bien, haciendo un análisis netamente visual se observa lo siguiente: El índice NDVI (índice de vegetación de diferencia normalizada) que se muestra en las Figuras 50 y 55, y el índice SAVI (índice de vegetación ajustado al suelo) que se muestra en las Figuras 52 y 57, presentan resultados muy similares, se puede evidenciar que el suelo desnudo tiende a confundirse con los polígonos constructivos y además en comparación con los otros índices la parte de vegetación que separa a los dos asentamientos objeto de estudio no se ve tan consolidada y definida, estos dos índices por ahora son los que primero se descartarían para la caracterización de los polígonos constructivos. El MSAVI2 (índice de vegetación ajustado al suelo modificado) que se muestra en las Figuras 53 y 58, en comparación a los dos índices anteriores presenta mejorías sin embargo se logra identificar que confunde vegetación con algunos polígonos constructivos. Por lo anterior, se concluye que los índices que representan con mayor claridad las construcciones a nivel predial son: el DVI (índice de vegetación de diferencia) que se muestra en las Figuras 51 y 56, y el BI2 (índice acumulado no dedicado o segundo índice de brillo) que se muestra en las Figuras 54 y 59, ya que, dichos índices son los que a partir de características pictórico-morfológicas mejor presentan las coberturas de análisis, donde los polígonos se detallan más y la organización de los pixeles de acuerdo a la zona de interés es mejor.

7.2.4. Postprocesamiento de los índices espectrales

- **7.2.4.1. Segmentación de índices**

  Una vez ejecutado el proceso de segmentación del ráster se obtienen los siguientes resultados: la Figura 60 corresponde a la segmentación del índice de vegetación de diferencia normalizada, la Figura 61 corresponde a la segmentación del índice de vegetación de diferencia, la Figura 62 corresponde a la segmentación del índice de vegetación ajustado al suelo, la Figura 63 corresponde a la segmentación del índice de vegetación ajustado al suelo modificado y la Figura 64 corresponde a la segmentación del índice acumulado no dedicado o segundo índice de brillo. Cabe destacar que su representación emplea la misma paleta de colores para discriminar de forma similar las coberturas de interés:

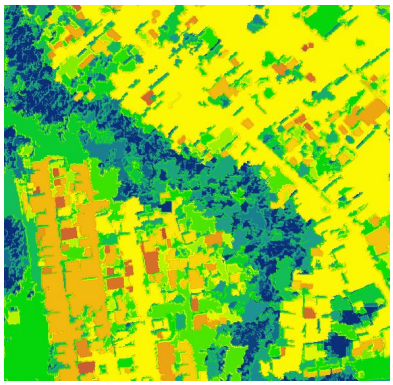


Figura 60: Segmentación NDVI

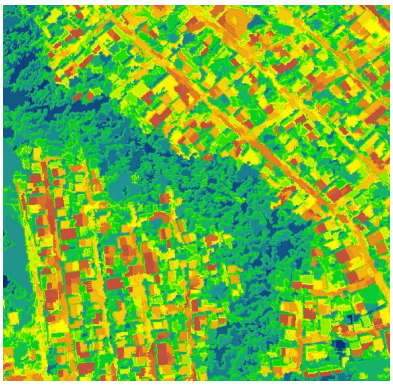


Figura 61: Segmentación DVI

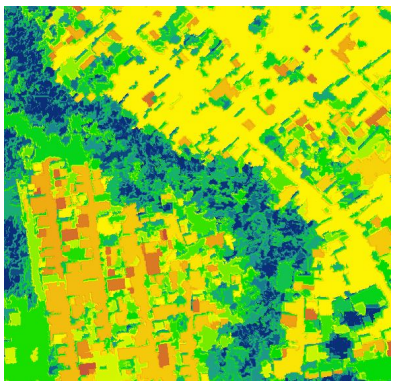


Figura 62: Segmentación SAVI

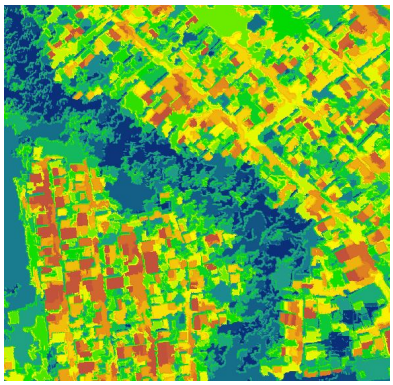


Figura 63: Segmentación MSAVI2

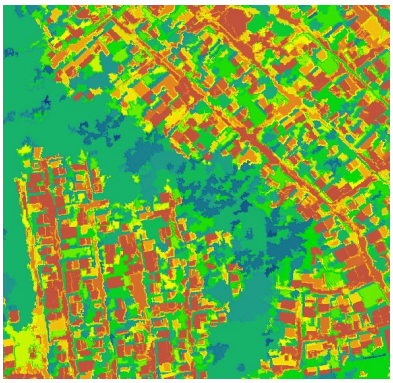


Figura 64: Segmentación BI2

Este resultado se conforma por un archivo de segmentos en formato Ráster y una tabla de atributos de las estadísticas de los segmentos, esta información es la que se utilizara para realizar el siguiente paso que es clasificar los segmentos en las clases de coberturas requeridas.

- **7.2.4.2. Reclasificación SLICE y 7.2.4.3. Extracción por atributos de los rásteres**

  Una vez realizada la detección de los atributos que contienen las coberturas de interés y píxeles de espectros cercanos se realizó la reclasificación y extracción, según el índice espectral que se seleccione esta será la información tipo ráster que se propone como línea base para el proceso de formación catastral, como se puede observar a continuación; aquí se sigue la tendencia a que los índices NDVI (Figura 65) y SAVI (Figura 67) presentan las peores discriminaciones de coberturas y los índices DVI (Figura 66) y BI2 (Figura 69) las mejores representaciones. Mientras que le índice MSAVI2 sigue siendo una representación intermedia (Figura 68).



Figura 65: Reclasificación NDVI



Figura 66: Reclasificación DVI



Figura 67: Reclasificación SAVI



Figura 68: Reclasificación MSAVI2

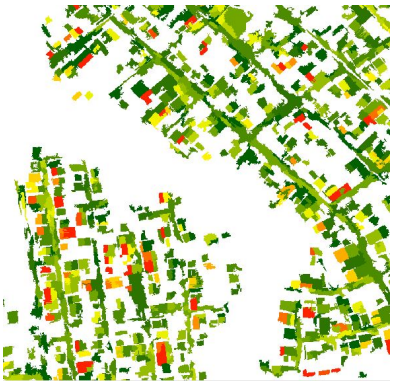


Figura 69: Reclasificación BI2

- **7.2.4.4. Transformación de las escenas de almacenamiento de datos tipo raster a tipo vector (polygon)**

  Ahora bien, tras procesar los rásteres extraídos a polígonos obtenemos:

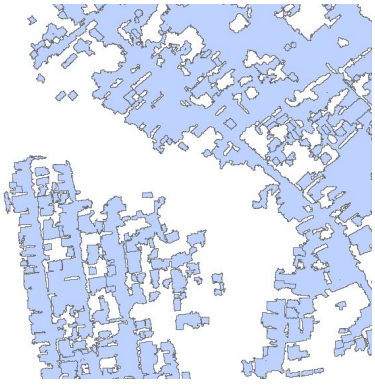


Figura 70: Polígonos NDVI

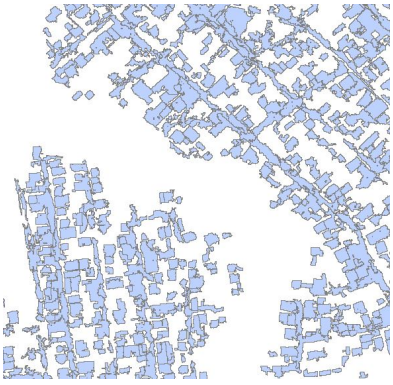


Figura 71: Polígonos DVI



Figura 72: Polígonos SAVI

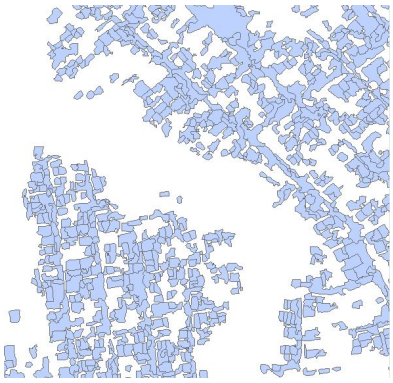


Figura 73: Polígonos MSAVI2

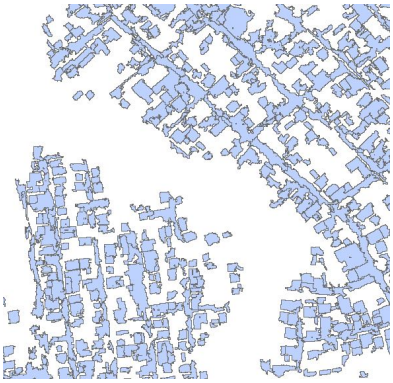


Figura 74: Polígonos BI2

Después de realizar el postprocesamiento, finalmente se obtuvieron los polígonos constructivos dados por cada índice espectral, esta representación visual permite realizar una mejor comparación entre ellos, de entrada y como se nombraba anteriormente los índices con resultados más desfavorables son: el NDVI (Figura 70) y el SAVI (Figura 72), en estos dos índices podemos evidenciar que no existe una caracterización a nivel predial. En cuanto al índice MSAVI2 (Figura 73), los polígonos obtenidos si tienden a comportarse como construcciones sin embargo se sigue evidenciando que existe confusión entre el suelo desnudo y las construcciones. Finalmente, la selección recae entre los índices DVI (Figura 71) y BI2 (Figura 74), ya que son los que mejor representan a nivel predial las construcciones.

- **7.2.4.5. Selección de la capa vector que mejor representa los datos**

Para la selección de la mejor capa vector que representa los datos se realizó una comparación entre los resultados dados por los índices DVI y BI2, analizando cual ofrecía una mejor representación visual de los asentamientos y cual discriminaba mejor el suelo desnudo de las construcciones. Finalmente a criterio del interprete se escoge la capa vector proveniente del índice espectral DVI dado es el que mejor correspondencia presenta con las coberturas de interés, y de esta manera con funciones como Eliminate y herramientas como la selección por atributos se depuran datos y se deja listo el producto que será propuesto como información línea base para la ejecución de los procesos catastrales, especialmente el proceso de formación catastral. A continuación se observa una paralela entre la Figura 75 que representa la Fusión por método de Multiplicación sobre la cual se aplicaron los índices espectrales, y la Figura 76 que es el resultado obtenido después de todo el procesamiento:



Figura 75: Fusión RGB NIR



Figura 76: Polígonos finales

Finalmente, en la Figura 77 se muestra la representación gráfica de los polígonos constructivos propuestos como información línea base para el proceso de formación catastral:

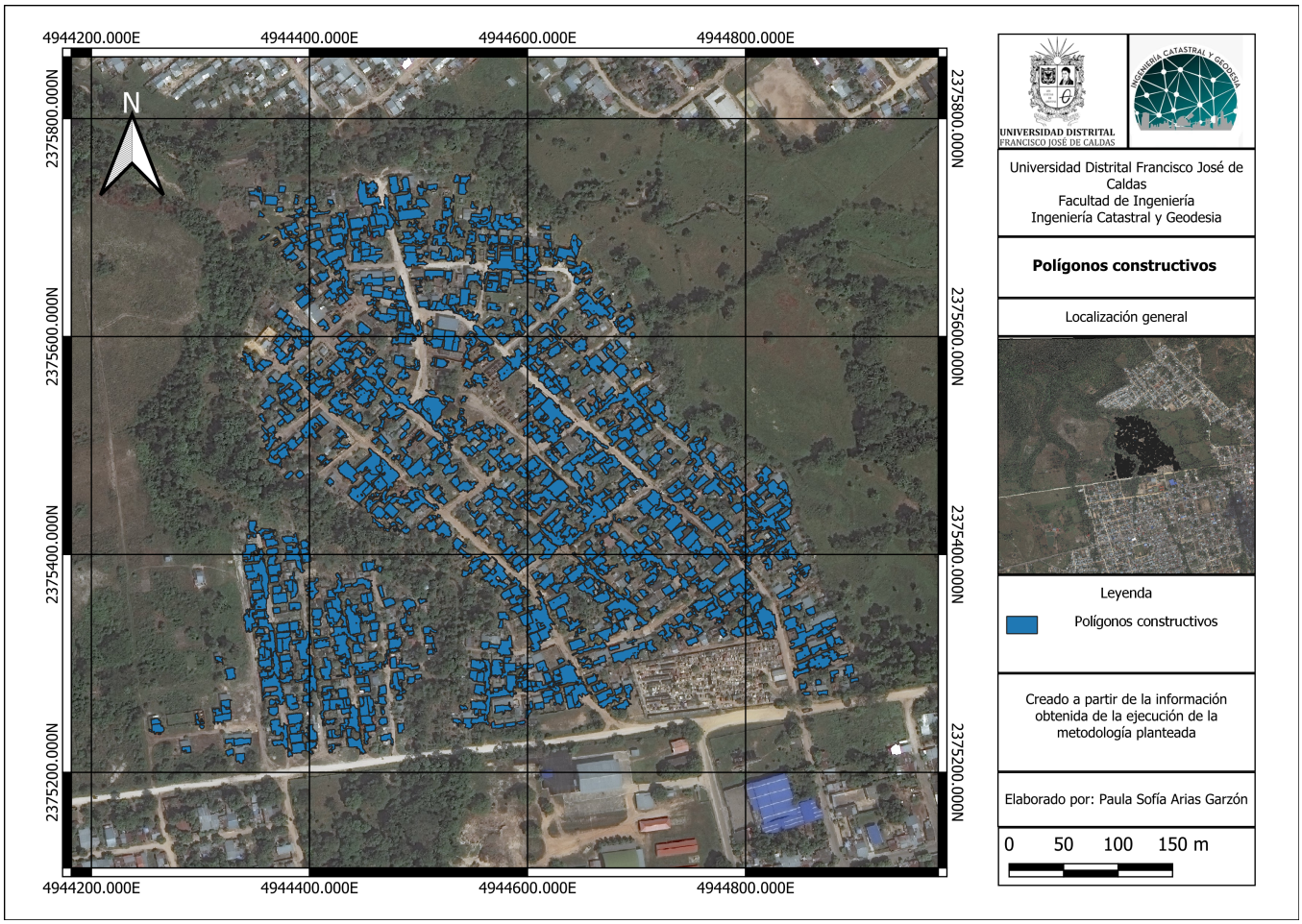


Figura 77: Polígonos Constructivos

A la luz del catastro multipropósito este resultado es de suma importancia ya que desde métodos indirectos se está logrando adquirir información a nivel físico de una zona que no contaba con ningún tipo de información, cabe resaltar que esta no se puede considerar como oficial sin realizar una verificación en campo, pero si puede considerarse como la línea base para iniciar los procesos catastrales, ya que como se nombraba anteriormente la inscripción en catastro no sanea los asuntos jurídicos del inmueble, pero si permite al país y al municipio ser consciente de lo que existe en su territorio y empezar a formular políticas públicas. En este caso de estudio estas políticas van orientadas a la regularización de dichos asentamientos informales, ya que según la constitución los ciudadanos tienen derecho a una vivienda digna, por ello se debe proporcionar servicios públicos e infraestructura propia para el desarrollo del sector. Es importante recalcar que no todos los asentamientos informales llegan a este proceso de regularización, ya que, eso depende de muchas condiciones externas las cuales el municipio analiza y toma una decisión.

7.3. Fase 3. Validación de los resultados obtenidos

7.3.1. Clasificación supervisada

Cabe resaltar que el proceso de clasificación supervisada es altamente empleado en la determinación de coberturas, este proceso puede arrojar interesantes resultados que favorecen a la interpretación de imágenes y una ventaja que tiene es que se puede realizar con cualquier tipo de imagen, lo cual hace que se pueda realizar en imágenes tanto de uso gratuito como de uso privado, por ello, es que se tomó como método de validación, ya que es usado tradicionalmente para este tipo de discriminación de coberturas. Es así, como al realizar todo el proceso de la clasificación supervisada se obtuvieron los siguientes resultados:



Figura 78: Escena RGB WorldView3

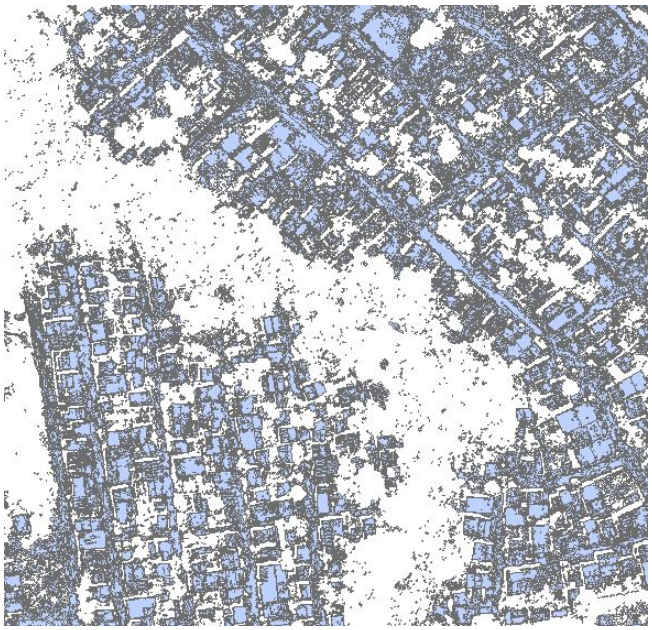


Figura 79: Clasificación supervisada

Es importante reconocer que la clasificación supervisada se ejecutó a partir de diez zonas de entrenamiento para cada una de las coberturas correspondientes a: Construcciones informales,

suelo desnudo, vegetación baja, vegetación frondosa o seto matorral, cuerpos de agua (pocos). Con lo cual se pretendía clasificar con una discriminación objetiva enfatizando diferencias entre suelo desnudo y construcciones; sin embargo al tratarse de una escena RGB (Figura 78) con un espectro en teoría cercano y sin contar con una banda infrarroja que discrimine dichas coberturas el resultado no fue tan optimo tal y como se esperaba. Tras asemejar los procesos aplicados en el postprocesamiento de los índices espectrales, los resultados no mejoraron dado que no se logró caracterizar los polígonos de los predios a formar a partir de dicha clasificación supervisada; validando así que la fusión de imágenes con el infrarrojo cercano NIR si se constituye como una mejora a la imagen, la cual, se traduce como mejores resultados a la hora de obtener información línea base a nivel predial de los asentamientos informales trabajados. Cabe resaltar que de no contar con la banda del infrarrojo cercano NIR la aplicación de los índices planteados no se puede realizar.

Sumado a lo anterior, se puede comparar la Figura 76 y 77 que son los polígonos finales obtenidos de la metodología planteada a partir de fusión de imágenes e índices espectrales, con la Figura 79 que son los polígonos obtenidos a través de la clasificación supervisada realizada en la escena satelital WorldView3, la diferencia visual es bastante, se puede evidenciar que en la Figura 79 hay mucho ruido en la imagen, algunos polígonos constructivos se diferencian pero son realmente pocos, ya que, la discriminación de coberturas no se dio de manera adecuada, igualmente es muy fácil confundir suelo desnudo con polígonos constructivos. Es de resaltar que la discriminación de cobertura vegetal si se parece a la realidad. Se puede analizar entonces que la clasificación supervisada dificulta la interpretación de coberturas, lo cual implicaría que si se quiere tomar como insumo sería un poco tedioso entender la información, sin embargo es una herramienta que se puede utilizar como apoyo cuando no se cuenta con los insumos necesarios para realizar una fusión de imágenes, pero los resultados no son comparables en cuanto a precisión y claridad.

7.3.2. Verificación en campo

Una vez realizada la visita al área de estudio, efectivamente se comprobó que la mayoría de los polígonos que se plantean como información línea base para el proceso de formación catastral existían en terreno. Por otra parte, tras conversar en la Alcaldía municipal con la oficina de Planeación se menciona que en efecto el proceso de regularización de dichos asentamientos informales ha avanzado progresivamente desde el año 2018, donde se identifican alrededor de 700 viviendas, algunas a la cuales, como se observa en la Figura 80, ya se les ha asignado nomenclatura domiciliaria provisional y se les ha denominado como urbanizaciones:

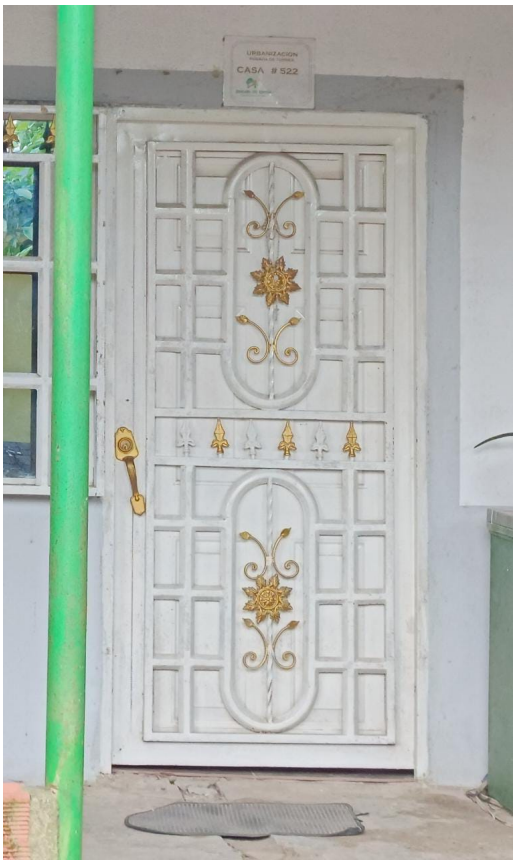


Figura 80: Nomenclatura provisional

Del acercamiento a los poseedores se obtuvo información de que el proceso se ha visto dilatado en carácter temporal dada la complejidad del saneamiento de dichos inmuebles donde no todos presentan las mismas tipologías constructivas o donde se encuentran casa-lotes que no han iniciado el proceso por las condiciones constructivas independientes. Así mismo mencionan que cuentan con servicios públicos como la luz, pero se evidencia que el espacio público es irregular dadas las mismas condiciones de informalidad, lo cual dificulta la regularización de estos.Por otra parte, durante la visita se pudo observar que según los materiales de construcción de la vivienda se puede obtener una mejor caracterización con la metodología , también se observó que las carreteras aún se encuentran sin pavimentar.

A continuación en la Figura 81, se relaciona un mapa con algunas verificaciones en campo:

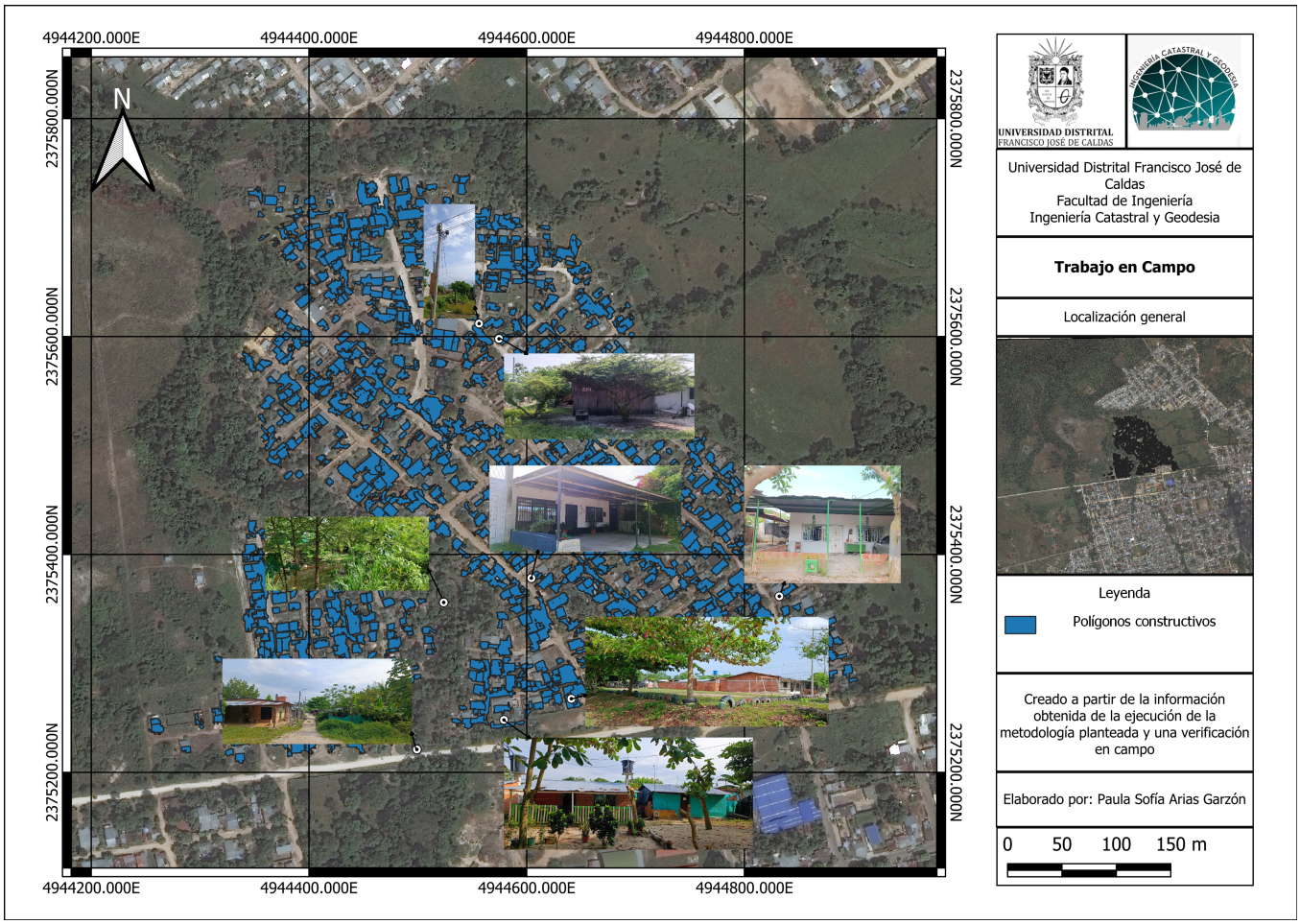


Figura 81: Verificación en campo

Otra cosa importante que se pudo verificar en campo es que efectivamente los dos asentamientos informales objeto de estudio comparten características tanto de zona rural como de zona urbana, de zona rural se comparten esos entornos llenos de vegetación, unas carreteras sin pavimentar y espacios públicos creados por los mismos poseedores, de zona urbana se comparte esa división en forma de manzanas y la tipología constructiva que se maneja. Lo anterior muestra que definitivamente los asentamientos informales se salen de todo tipo de planeación municipal y como se nombraba anteriormente en algunos casos se resuelve de manera fácil, como el área de estudio trabajada donde la Alcaldía ya adelanta procesos de regulación, con el fin de establecer estos asentamientos como barrios verdaderos con la infraestructura correspondiente. Sin embargo, no todos los asentamientos informales se regularizan, existen casos como los que actualmente se han visto en Cali donde los procesos son más tediosos e incluso pueden terminar en desalojos.

8. Conclusiones

- La presente investigación encontró que a partir de métodos indirectos de adquisición de información, con dos imágenes satelitales gratuitas como insumo principal, se pudieron

obtener diferentes insumos intermedios que permitieron llegar a un resultado final que tenía congruencia con la realidad. Por el lado de las fusiones se obtuvo una fusión por método de Multiplicación que mostro tanto ganancia espectral como espacial. En cuanto a los aspectos a mejorar, se puede concluir que es necesario seguir investigando que índices espectrales pueden dar mejores resultados, ya que, de los cinco índices espectrales aplicados solo dos realmente se acercaron a representar los polígonos constructivos de mejor manera. Por otra parte, se destaca el hecho de que los diferentes procesos aquí planteados no tienen una dificultad alta a la hora de realizarlos en el software, sin embargo es necesario tener conocimientos previos de procesamiento digital de imágenes e interpretación de imágenes, de esta última dependen muchos de los resultados obtenidos, ya que el intérprete debe tomar decisiones sobre los resultados que arroja el software. Teniendo en cuenta lo anterior, se concluye que esta investigación, la cual propone el desarrollo de un marco procedimental a partir del procesamiento digital de imágenes, fusión de imágenes y el uso de índices espectrales, logra una caracterización y modelamiento eficaz de los asentamientos informales ubicados en el norte del municipio de Sabana de Torres, Santander, Colombia; lo anterior dado que, se obtiene una visualización clara a nivel constructivo vía satélite, a partir de productos cómo representaciones visuales, capas vector y ráster. Sin embargo se resalta el hecho de que hay que seguir investigando la aplicación de más índices espectrales.

- La fusión de imágenes entre una escena falsa pancromática y una escena multiespectral genera una imagen con alta resolución espacial y espectral, esto se pudo verificar con la aplicación de los índices de calidad de imágenes de Vaiopoulos y fue la razón de por la que se eligió la fusión por el método de multiplicación, ya que este mostraba que la imagen había ganado tanto riqueza espacial como espectral, lo cual permite tener una imagen con más información y calidad para realizar el cálculo de los índices espectrales. Es de resaltar, que en este caso no se contaba con una banda pancromática, por lo cual, se planteó como solución la creación de la escena falsa pancromática, que permitió realizar los procesos de fusión. Todo esto refleja que mediante el procesamiento digital de imágenes se pueden generar productos intermedios que se van entrelazando entre ellos con el fin de llegar a un producto final, en nuestro caso la información línea base para el proceso de formación catastral.

- En cuanto a los cinco índices aplicados: NDVI (índice de vegetación de diferencia normalizada), DVI (índice de vegetación de diferencia), SAVI (índice de vegetación ajustado al suelo), MSAVI2 (índice de vegetación ajustado al suelo modificado) y el BI2 (índice acumulado no dedicado o segundo índice de brillo), los índices NDVI y SAVI fueron los que peores resultados obtuvieron, el índice MSAVI2 mejoraba en comparación a los dos anteriores pero aún se evidenciaban errores en la clasificación de coberturas, y finalmente los índices DVI y BI2 fueron los que mejor caracterizaban los polígonos constructivos, sin embargo, por diferencias pictórico morfológicas, exactitud temática y otros pequeños detalles se eligieron los resultados generados por el índice DVI como la información línea base propuesta. Cabe resaltar que los polígonos obtenidos son una buena aproximación a lo que en realidad existe en campo, sin embargo también se presentan disparidades, las cuales, son precisas depurar y analizar; por ello la importancia de realizar un postprocesamiento que mejore la calidad de la información que será utilizada para tener un punto

de partida y no iniciar desde cero el proceso de formación catastral.

- En cuanto a lo relacionado con la validación, efectivamente se contrasta la eficacia del marco procedimental empleado con respecto a los métodos convencionales de clasificación, siendo la metodología propuesta la que mejor representación constructiva obtiene, reduciendo así el ruido y las disparidades ocasionadas por la identificación errónea de píxeles de suelo asimilados como construcciones. Es importante tener en cuenta que la información obtenida se debe verificar en campo obligatoriamente.

- Se destaca el hecho de que utilizar métodos indirectos para la adquisión de información puede resultar de suma importancia en la implementación del catastro multipropósito, ya que metodologías basadas en métodos indirectos se pueden convertir en una herramienta útil para los gestores y operadores catastrales, optimizando procesos y reduciendo el tiempo de ejecución de estos. También, el catastro multipropósito debe dar herramientas a los municipios pequeños a los que es difícil acceder, para que ellos empiecen a implementar su catastro, el cual ahora tiene visión descentralizada. Por eso los resultados obtenidos a partir de metodologías que surgen de la aplicación de métodos indirectos, son un reflejo que no necesariamente por estar en una zona de difícil acceso esta tiene que dejarse en el olvido, por el contrario hay que gestionar herramientas que permitan que estas zonas cuenten con las mismas oportunidades a nivel catastral que las grandes ciudades donde es más fácil llegar. En general, se puede decir que el marco procedimental utilizado puede ser una herramienta innovadora a la hora de realizar procesos catastrales, ya que, fortalece la relación entre Catastro, Tecnologías de la Información y Gestión de Tierras; especialmente puede ser útil para el proceso de formación catastral de asentamientos informales, debido a que estos no cuentan con ningún tipo de información previa.

- Se recomienda a los municipios realizar alianzas académicas con el fin de replicar metodologías como la planteada en el presente documento, esto permitirá que los estudiantes ganen experiencia y pongan sus conocimientos al servicio de la comunidad, mientras que los municipios adquieren información que les permite implementar el catastro multipropósito, generar políticas públicas y lo más importante conocer su territorio. Finalmente, se concluye que son los Ingenieros Catastrales y Geodestas los que deben buscar investigar y proponer metodologías innovadoras que ayuden al país a mejorar su situación catastral.

Referencias

Arboit, M. E., y Maglione, D. S. (2018). Análisis multitemporal y multiespacial del índice de vegetación de diferencia normalizada (ndvi) y del índice de vegetación ajustado al suelo (savi) en centros urbanos forestados y oasis irrigados, con climas secos.

ArcGIS. (2022). *MSAVI—ArcGIS Pro | Documentación.* Descargado 2022-09-25, de https://pro.arcgis.com/es/pro-app/latest/arcpy/image-analyst/msavi.htm

Audícana, M., Otazu, X., Fors, O., y Alvarez, J. (2006). A low computational-cost method to fuse ikonos images using the spectral response function of its sensors. *IEEE Transactions on Geoscience and remote sensing*, *44*(6), 1683–1691.

Audícana, M., Otazu, X., Fors, O., y Seco, A. (2005). Comparison between mallat's and the 'à trous' discrete wavelet transform based algorithms for the fusion of multispectral and panchromatic images. *International Journal of Remote Sensing*, *26*(3), 595–614.

Buzzi, M. A., Rueter, B. L., y Ghermandi, L. (2017). Múltiples índices espectrales para predecir la variabilidad de atributos estructurales y funcionales en zonas áridas. *Ecología austral*, *27*(1), 55–62.

Cacciola, M., Morabito, F., y Simone, G. (2008, enero). Image Fusion: Algorithms and Applications. En (pp. 367–392).

Castellanos, H. O. A. (2016). Diseño metodológico para clasificar zonas mineras a cielo abierto a través del procesamiento digital de imágenes de sensores remotos, aplicado en el nor-oriente del departamento de antioquía. *Facultad de Agronomía*.

Cervantes, E. (2014). *Clasificación de imágenes satelitales mediante el uso de memorias asociativas.* Obtenido de Instituto Politécnico Nacional: https://tesis. ipn. mx/bitstream ....

Cheng, Y., Vrieling, A., Fava, F., Meroni, M., Marshall, M., y Gachoki, S. (2020). Phenology of short vegetation cycles in a kenyan rangeland from planetscope and sentinel-2. *Remote sensing of environment*, *248*, 112004.

Choi, M. (2006). A new intensity-hue-saturation fusion approach to image fusion with a tradeoff parameter. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote sensing*, *44*(6), 1672–1682.

Congo, P. J. W. (2015). *Aplicaciones del software matlab/simulink en modelado de sistemas básicos de telecomunicaciones* (B.S. thesis). Quito, 2015.

Cuevas, E., Zaldívar, D., y Pérez, M. (2016). *Procesamiento digital de imágenes con matlab & simulink*. Ra-Ma.

Decastro, S., Hoyos, M. C., y Umaña, V. (2011). Legalización de barrios informales prestación de servicios públicos:¿ una medida constitucional paliativa o un paso hacia la legalización. *Revista Programa Socrates, Universidad de los Andes*, 01–25.

Díaz, J., García-Cervigón José. (2015). Estudio de índices de vegetación a partir de imágenes aéreas tomadas desde uas/rpas y aplicaciones de éstos a la agricultura de precisión.

DNP. (2022). *Noticias.* Descargado 2022-10-07, de https://catastromultiproposito.dnp.gov.co/noticias/Paginas/noticias.aspx

ESA. (2022a). *PlanetScope - Tierra en línea.* Descargado 2022-10-04, de https://earth.esa.int/eogateway/missions/planetscope

ESA. (2022b). *WorldView-3 - Earth Online.* Descargado 2022-09-25, de https://earth.esa.int/eogateway/missions/worldview-3

Escobar, N., y Cárdenas, J. H. (2018). Retos de un nuevo sistema catastral en el marco de construcción de paz en colombia. *Revista de Ingeniería*(46), 46–53.

ESRI. (2022). *¿Qué es ArcGIS? | ArcGIS Resource Center.* Descargado 2022-10-04, de https://bit.ly/resourcesarcgis

Fabijańczyk, P., y Zawadzki, J. (2022). Spatial correlations of ndvi and msavi2 indices of green and forested areas of urban agglomeration, case study warsaw, poland. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, *26*, 100721.

Fernandes, E. (2011). Regularización de asentamientos informales en américa latina. *Lincoln Institute of Land Policy*.

Gadal, S., y Ouerghemmi, W. (2019). Multi-level morphometric characterization of built-up areas and change detection in siberian sub-arctic urban area: Yakutsk. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, *8*(3). Descargado de https://www.mdpi.com/2220-9964/8/3/129

Geospatial, L. (2022). *Imágenes de satélite WorldView-3 | Imágenes satelitales de alta resolución de DigitalGlobe | L3Harris geoespacial.* Descargado 2022-10-04, de https://bit.ly/WorldView3SatelliteImagery

González, H. D. E., y Bueno, M. W. L. (2017). Implementación y evaluación de métodos convencionales y la transformada wavelet, para la fusión de imágenes satelitales rapideye y sentinel 2a, caso de estudio: Departamento de cundinamarca.

Gordo, J. F. R., y Robles, C. L. (2010). la fusión de imágenes de teledetección: una ayuda para la interpretación de entornos urbanos. *EGA Expresión Gráfica Arquitectónica*, *15*(15), 182–189.

Herrera, N. Y. (2018). Análisis multitemporal del estado de la vegetación en los municipios cota, chía y cajicá en el tramo de puente vargas hasta puente de la virgen sobre el área de influencia del río bogotá a partir de imágenes satelitales.

Hexagon. (2022). *ERDAS IMAGINE.* Descargado 2022-10-04, de https://hexagon.com/products/erdas-imagine

Huang, H., y Roy, D. (2021). Characterization of planetscope-0 planetscope-1 surface reflectance and normalized difference vegetation index continuity. *Science of Remote Sensing*, *3*, 100014.

IGAC. (2022a). *Catastro Multipropósito.* Descargado 2022-10-03, de https://bit.ly/igaccatastromultiproposito

IGAC. (2022b). *SABANA DE TORRES en Sabana De Torres, Santander - Diccionario Geográfico de Colombia.* Descargado 2022-10-05, de https://diccionario.igac.gov.co

Ingeoexpert. (2022). *Clasificaciones de imágenes de satélite.* Descargado 2022-10-07, de https://ingeoexpert.com/articulo/clasificaciones-de-imagenes-de-satelite/

Jensen, J. R., y Cowen, D. C. (1999). Remote sensing of urban/suburban infrastructure and socio-economic attributes. *Photogrammetric engineering and remote sensing*, *65*, 611–622.

Kruse, F. A., Baugh, W. M., y Perry, S. L. (2015). Validation of digitalglobe worldview-3 earth imaging satellite shortwave infrared bands for mineral mapping. *Journal of Applied Remote Sensing*, *9*(1), 096044.

Li, X., Yao, R., Liu, M., Costanzo, V., Yu, W., Wang, W., ... Li, B. (2018). Developing urban residential reference buildings using clustering analysis of satellite images. *Energy and Buildings*, *169*, 417–429.

Lillo, S. M. F., y Gonzalo, C. (2008). Aplicación de la metodología de fusión de imágenes multidirección-multiresolución (mdmr) a la estimación de la turbidez en lagos. *Información tecnológica*, *19*(5), 137–146.

Linares, S., y Tisnés, A. (2011). Extracción y análisis de superficies urbanas construidas empleando imágenes landsat 5 (tm). En *I congreso nacional de tecnologías de la información geográfica y iv reunión de usuarios de tecnologías de la información geográfica del nea.*

Lombard, M. (2012). Planeación insurgente en asentamientos informales: un estudio de caso en cali, colombia. *Cuadernos de Vivienda y Urbanismo*, *5*(10).

López, J. A. (2018). Generación de cartografía vectorial automática para cuerpos de agua aplicando análisis multiresolución en imágenes satelitales de alta resolución espacial en la sabana de bogotá.

MathWorks. (2022). *MATLAB - El lenguaje del cálculo técnico.* Descargado 2022-10-04, de `https://la.mathworks.com/products/matlab.html`

Matic, I., y Moreno, L. (2017). El catastro multipropósito en colombia, una herramienta para la construcción de paz. *CT: Catastro*(90), 97–120.

Melo, E. T., Sales, M. C. L., y Oliveira, J. G. B. (2011). Aplicação do índice de vegetação por diferença normalizada (ndvi) para análise da degradação ambiental da microbacia hidrográfica do riacho dos cavalos, crateús-ce. *Raega-O Espaço Geográfico em Análise*, *23*.

Molina, M.-G. A. (2015). Catastro multipropósito sostenible: una necesidad inaplazable. *Revista Cartográfica*(91), 9–33.

Mora, D. S., Ortiz, A. C., Cuellar, L. M., Torrejano, V. M., y Pastrana, D. A. M. (2018). Análisis de índices de vegetación en el cultivo de arroz en la finca la tebaida del municipio de campoalegre. *Revista Agropecuaria y Agroindustrial La Angostura*, *5*(1).

Munechika, C. K., Warnick, J. S., Salvaggio, C., y Schott, J. R. (1993). Resolution enhancement of multispectral image data to improve classification accuracy. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, *59*, 67-72.

Muñoz, A. P. (2013). Apuntes de teledetección: índices de vegetación.

Naji, T. A. (2018). Study of vegetation cover distribution using dvi, pvi, wdvi indices with 2d-space plot. En *Journal of physics: Conference series* (Vol. 1003, p. 012083).

Parra, A., y Hernández, F. L. (2010). Identificación y delimitación de humedales lénticos en el valle alto del río cauca mediante el procesamiento digital de imágenes de satélite. *Ingeniería de Recursos Naturales y del Ambiente*(9), 77–88.

Pérez, B. J. I., y Restrepo, S., Rodríguez. (2018). Catastro como instrumento para el desarrollo territorial. *Revista de ingenieria*(46), 32–39.

Perez, C., y Muñoz, A. L. (2006). *Teledetección: nociones y aplicaciones.* carlos perez.

Pinzón, J. A. P., y Fonti, J. F. (2007). Una aproximación al catastro en colombia. *UD y la geomática*(1), 25–46.

PlanetScope. (2022). *Planetscope solutions overview.* Descargado 2022-09-26, de `https://bit.ly/learnplanetscope`

PRIAS. (2013). Procesamiento de imágenes ASTER para la elaboración de cartografía base del Censo Nacional Agropecuario 2013-2014. , 81.

Pucha, C. F., Fries, A., Cánovas, G. F., Oñate, F., Valdivieso, y Pucha, C. D. (2017). Fundamentos de sig. *Aplicaciones de ArcGIS. Loja, Ecuador: Ediloja Cía. LTDA.*

Puente, C. A. (2001). *Génesis, evolución y consolidación de los asentamientos clandestinos:*

tres casos en la ciudad de bogotá (Tesis Doctoral no publicada). Arquitectura.

Ramos, R. L. (2003). La modernización del catastro colombiano. *Revista de Ingeniería*(18), 156–166.

Rasul, A., Balzter, H., Ibrahim, G. R. F., Hameed, H. M., Wheeler, J., Adamu, B., ... Najmaddin, P. M. (2018). Applying built-up and bare-soil indices from landsat 8 to cities in dry climates. *Land*, *7*(3). Descargado de `https://www.mdpi.com/2073-445X/7/3/81` doi: 10.3390/land7030081

Sabins, J. F. F. (1978). Remote sensing. *Remote sensing.*.

Salvatierra, C. (2004). *Fundamentos de procesamiento digital de imágenes de satelite.* Mendoza, Argentina: Universidad nacional de cuyo.

Sobrino, J. A. (2001). *Teledetección.* Universitat de València. (Google-Books-ID: Yb6xIldfoT0C)

Technologies, R. (2021, mayo). *ERDAS Imagine: Software para trabajar con imagen de satélite.* Descargado 2022-10-04, de `https://bit.ly/GeoinnovaErdasImagine`

Tituaña, C. M. (2018). *Análisis multitemporal del crecimiento urbano de shushufindi y sus áreas de asentamientos informales, período 1990-2017* (Tesis de Master no publicada). Quito: UCE.

Treviño, G. E. J. (2001). Estratificación de la información en el procesamiento digital de imágenes de satélite aplicado a la cartografía de los bosques de pinus cembroides. *Investigaciones geográficas*(44), 54–63.

Tristán, P., Wainschenker, R., y Doorn, J. H. (2008). Normalización de imágenes satelitales en el análisis multi-temporal. En *X workshop de investigadores en ciencias de la computación.*

Tu, Lee, Y.-C., Chang, C.-P., y Huang, P. S. (2005). Adjustable intensity-hue-saturation and brovey transform fusion technique for ikonos/quickbird imagery. *Optical Engineering*, *44*(11), 116201.

Tu, Su, S.-C., Shyu, H.-C., y Huang, P. S. (2001). A new look at ihs-like image fusion methods. *Information fusion*, *2*(3), 177–186.

UNAL. (2022). *Catastro multipropósito: clave para el desarrollo económico de Colombia.* Descargado 2022-10-07, de `https://bit.ly/unperiodicounalCatastromultiproposito`

Uribe, H. (2011). Los asentamientos ilegales en colombia: las contradicciones de la economía-mundo capitalista en la sociedad global. *Latinoamérica. Revista de estudios latinoamericanos*(53), 169–200.

Vaiopoulos, A. D. (2011). Developing matlab scripts for image analysis and quality assessment. En *Earth resources and environmental remote sensing/gis applications ii* (Vol. 8181, pp. 60–71).

Vojkovic, A. E. (1993). Software erdas imagine versión 8.01 agosto 1992, versión 8.02 marzo 1993: características generales.

Wald, L. (2002). *Data fusion: definitions and architectures: fusion of images of different spatial resolutions.* Presses des MINES.

Xian, G., Shi, H., Dewitz, J., y Wu, Z. (2019). Performances of worldview 3, sentinel 2, and landsat 8 data in mapping impervious surface. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, *15*, 100246.

Zhang, X., y Du, S. (2015). A linear dirichlet mixture model for decomposing scenes: Application to analyzing urban functional zonings. *Remote Sensing of Environment*, *169*, 37–49.