

Sistema para identificar y cuantificar asbesto por medio de imágenes satelitales.

Luis Carlos Chicaíza Rojas

PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA
FACULTAD DE INGENIERIA
MAESTRÍA EN INGENIERÍA DE SISTEMAS Y COMPUTACIÓN
BOGOTÁ, D.C.
2020

Sistema para identificar y cuantificar asbesto por medio de imágenes satelitales.

Autor:

Luis Carlos Chicaíza Rojas

MEMORIA DEL TRABAJO DE GRADO REALIZADO PARA CUMPLIR UNO
DE LOS REQUISITOS PARA OPTAR AL TÍTULO DE
MAGÍSTER EN INGENIERÍA DE SISTEMAS Y COMPUTACIÓN

Director

Javier Francisco López Parra

Comité de Evaluación del Trabajo de Grado

Diego Andrés Casas Avellaneda

Blanca Elvira Oviedo Torres

Página web del Trabajo de Grado

<https://livejaverianaedu.sharepoint.com/sites/Ingsis/TGMISC/203006>

PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA
FACULTAD DE INGENIERIA
MAESTRÍA EN INGENIERIA DE SISTEMAS Y COMPUTACIÓN
BOGOTÁ, D.C.
Diciembre, 2020

**PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA
FACULTAD DE INGENIERIA
MAESTRÍA EN INGENIERÍA DE SISTEMAS Y COMPUTACIÓN**

Rector Magnífico

Jorge Humberto Peláez, S.J.

Decano Facultad de Ingeniería

Ingeniero Lope Hugo Barrero Solano

Director Maestría en Ingeniería de Sistemas y Computación

Ingeniera Angela Carrillo Ramos

Director Departamento de Ingeniería de Sistemas

Ingeniero Efraín Ortíz Pabón

Artículo 23 de la Resolución No. 1 de Junio de 1946

“La Universidad no se hace responsable de los conceptos emitidos por sus alumnos en sus proyectos de grado. Sólo velará porque no se publique nada contrario al dogma y la moral católica y porque no contengan ataques o polémicas puramente personales. Antes bien, que se vean en ellos el anhelo de buscar la verdad y la Justicia”

AGRADECIMIENTOS

“Quiero agradecer principalmente a mi familia por el apoyo que me han brindado a lo largo de mi vida, sin ellos nada de esto sería posible, a mis compañeros de Universidad, al CJFD el cual ha sido parte integral en mi formación personal, al equipo de atletismo y a los los compadres, por su apoyo incondicional hasta en los momentos más complicados, a mis mascotas que jamás olvidare Vicky, Peter, Lucas y finalmente a mis profesores de la Facultad de Ingeniería de Sistemas quienes me han guiado hacia un proceso de formación integral cómo profesional y como persona, especialmente quiero agradecer al profesor Javier López por todo el apoyo en estos últimos años, sus observaciones me han servido para madurar y comprender mejor mi entorno. Muchas gracias a todos por su apoyo.”

Luis Carlos Chicaíza Rojas

Contenido

1. INTRODUCCIÓN.....	11
2. DESCRIPCIÓN GENERAL.....	12
PROBLEMÁTICA Y OPORTUNIDAD	12
3. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO.....	13
3.1 OBJETIVO GENERAL	13
3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	13
3.3 FASES DE DESARROLLO	13
3.3.1 Fase metodológica 1- Investigación preliminar	13
3.3.2 Fase metodológica 2 - Análisis	13
3.3.3 Fase metodológica 3 - Diseño.....	14
3.3.4 Fase metodológica 4 - Construcción	14
3.3.5 Fase metodológica 5 - Validación	14
4. ESTADO DEL ARTE	15
4.1. Firmas espectrales	15
4.2. Uso de imágenes hiperespectrales en la detección de asbesto	16
4.3. La resolución de las imágenes	18
5. MATERIALES Y MÉTODOS USADOS	21
5.1 SELECCIÓN DEL ÁREA A TRABAJAR	21
5.2 CONDICIONES Y RESTRICCIONES DEL SISTEMA PROPUESTO.....	23
5.2.1. Condiciones generales	23
5.2.2. Condiciones de funcionamiento	25
5.2.3. Restricciones generales del sistema.....	27
5.3 PROCEDIMIENTO METODOLÓGICO PROPUESTO.....	28
5.3.1 Selección de imagen satelital.....	28
5.3.2. Identificación del sector en la imagen satelital	28
5.3.3. Generación de la subimagen a trabajar	29
5.3.4. Preprocesamiento de la subimagen	31
5.3.5. Desarrollo de la clasificación.....	31
5.3.6. Validación	37
5.3.7. Integración con un SIG (Sistema de información Geográfico).....	38
6. RESULTADOS.....	39
6.1 SELECCIÓN DEL ÁREA A TRABAJAR	39

6.2 IDENTIFICACIÓN DEL SECTOR EN LA IMAGEN SATELITAL	40
6.3. GENERACIÓN DE LA SUBIMAGEN A TRABAJAR	43
6.4. PREPROCESAMIENTO DE LA SUBIMAGEN	45
6.4.1. <i>Linear</i>	46
6.4.2. <i>Histogram Equalization</i>	47
6.4.3. <i>Linear with saturation</i>	48
6.4.4. <i>Comparación de los resultados</i>	49
6.5 DESARROLLO DE LA CLASIFICACIÓN	51
6.5.1 <i>Clasificación Supervisada</i>	51
6.5.2. <i>Algoritmos de clasificación</i>	53
6.6. VALIDACIÓN	65
6.7. INTEGRACIÓN CON UN SIG (SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICO)	69
6.7.1. <i>Software para el procesamiento de fotografía aérea</i>	69
6.7.2. <i>Software para el procesamiento de imágenes satelitales</i>	69
6.7.3. <i>Integración</i>	70
6.7.4. <i>Construcción de Interfaz de consulta</i>	72
7. CONCLUSIONES	74
8. REFERENCIAS	76
9. ANEXOS	78
ANEXO I – INVESTIGACIÓN PRELIMINAR	78
ANEXO II - USO DE IMÁGENES SATELITALES PARA DETECCIÓN Y CUANTIFICACIÓN DE ASBESTO	78
ANEXO III – REQUERIMIENTOS	78
ANEXO IV - FOTOGRAFÍA ÁREA	78
ANEXO V- VALIDACIÓN DE CLASIFICACIÓN SUPERVISADA	78

ABSTRACT

The aim of this dissertation was to design and implement a system based on a series of metrics for the identification and classification of asbestos. The concepts used were borrowed from the literature on surface identification by means of satellite images. The methodology for the identification and classification of asbestos took into account the spectral signature, the resolution of pixels, among other essential aspects, to generate an efficient procedure that allows the identification of asbestos in roofs and buildings through satellite images.

RESUMEN

El presente trabajo de grado tuvo como objetivo diseñar y establecer un sistema a partir de una serie de métricas para la identificación y clasificación del asbesto. Para ello se usaron conceptos relevantes de trabajos de investigación y de aplicación práctica relacionados con la identificación de superficies por medio de imágenes satelitales. Con base en esto, se consolidó una metodología para la identificación y clasificación del asbesto teniendo en cuenta la firma espectral, la resolución de píxeles, entre otros aspectos esenciales para generar un procedimiento eficiente que permita la identificación del asbesto en techos y edificaciones mediante imágenes satelitales.

RESUMEN EJECUTIVO

Se desarrolló un sistema para la identificación de materiales en los techos de las edificaciones y/o superficies. Específicamente el sistema pretende ser una guía que permita ayudar a identificar y cuantificar el asbesto. Se hizo uso de imágenes satelitales para realizar la clasificación con el apoyo de la fotografía aérea, este apoyo fue un soporte para facilitar la identificación preliminar de una zona en donde pudieran existir cubiertas o edificaciones con contenido de asbesto. Para el desarrollo de este trabajo de grado se establecieron una serie de fases metodológicas, que incluyeron la identificación de las imágenes, el procesamiento de estas mediante el software correspondiente, la construcción de un mapa de clasificación, la integración de la mejor clasificación con un sistema de información geográfico y la construcción de una interfaz de consulta para los usuarios.

En la implementación del sistema fue de gran utilidad considerar las firmas espectrales. A partir de la literatura, se profundizaron varios conceptos de los cuales se destaca el uso de las firmas espectrales y las bibliotecas espectrales, las cuales consolidan una amplia gama de características de materiales comunes en las superficies. Las firmas espectrales han sido de gran utilidad para poder identificar y supervisar superficies de vegetación y zonas urbanas [1][2], por consiguiente, se pretende aprovechar este conocimiento generado que fue profundizado en otras investigaciones, en las cuales se registra el comportamiento en específico de algunos materiales urbanos conocidos, como los techos de zinc, de plástico, cerámica, asbesto, entre otros.

La clasificación de superficies se inicia con la identificación de varios materiales urbanos definiendo así una clasificación de la zona urbana. El uso de imágenes híperespectrales ha sido de gran utilidad para la identificación de materiales urbanos y rurales de una amplia cobertura terrestre. En un entorno nacional, para mencionar un ejemplo aplicado en la geología de Colombia, se ha hecho uso de este tipo de imágenes para identificar posibles zonas de explotación de recursos naturales. [3] Por consiguiente, se hace mención a la posibilidad de la identificación de minerales demostrando el uso de estas herramientas como un medio eficaz en el momento de generar una clasificación.

La investigación preliminar realizada en este trabajo de grado, más exactamente en el uso de imágenes satelitales con el apoyo de las firmas espectrales, permitió determinar los conceptos esenciales que deben considerarse y que son de gran importancia en el momento de identificar las características del asbesto en Colombia, por lo cual se puede destacar el papel de la reflectancia de las superficies o techos para poder automatizar la clasificación de este material. [4][5]

Al analizar la información, se genera una serie métricas, condiciones y restricciones que debe tener el sistema para que este pueda determinar el porcentaje del asbesto. El sistema propuesto ofrece una alternativa de solución para identificar el asbesto de una zona urbana, este sistema puede servir como apoyo a organismos o personal interesado en la regulación de este material. El sistema permitirá recolectar información de los techos con indicios de estar compuestos de asbesto, ofreciendo un principal indicador de los lugares en donde el material está expuesto,

además de que el sistema puede incentivar a generar por parte de los interesados una respuesta que mejore la calidad de vida de las personas.

Después del proceso de investigación preliminar y de analizar la información disponible acerca de la identificación del asbesto mediante imágenes satelitales, se procedió a consolidar el diseño de un sistema que permitiera identificar el asbesto. Este sistema está compuesto de una serie de subsistemas que interactúan entre sí para conseguir el objetivo propuesto, de este se destaca los subsistemas para la obtención de las imágenes, el almacenamiento y procesamiento de la información, y un subsistema de análisis de datos, el cual es el encargado de generar las clasificaciones aplicando los algoritmos propuestos.

Al establecer las condiciones y restricciones del sistema basado en los conceptos clave identificados en la investigación preliminar, se seleccionó una zona urbana en la cual se tuviera indicios de edificaciones con asbesto, esta área correspondió a un sector al sur de Bogotá, específicamente en el barrio ciudadela Boloña en Usme, en el cual se realizó un reconocimiento inicial de la zona mediante una salida de campo el día 29 de octubre de 2019, en el que se contó con el acompañamiento y la logística *del Programa Social PROSOFI*. En la salida de campo se tomó una serie de fotografías aéreas que permitiera identificar el tipo de cubiertas de los barrios, se realizaron varios recorridos con el acompañamiento de la comunidad del sector, en los cuales se identificaron techos de fibrocemento con asbesto.

Con la información recolectada se procedió a la obtención de las imágenes satelitales sobre el sector, estas imágenes pasaron por un proceso de ajuste respecto a la delimitación de un área cuadrada de alrededor de 1000 metros por 600 metros, en esta área seleccionada se procedió a definir unas clases para el entrenamiento de los algoritmos de clasificación supervisada, en donde se delimitaron unos polígonos correspondientes a cada clase, entre ellos se destaca el asbesto como la principal clase a identificar y otro tipo de cubiertas, como la zona de vegetación densa, el pasto, y materiales de zonas urbanas, como carreteras, techos de cerámica, entre otros.

A futuro, la información recolectada puede ayudar a generar más políticas que garanticen mejoras en la salud pública, ejercer mayor control sobre este tipo de material, generar acciones que permitan controlar actividades de construcción con asbesto, así como también generar elementos que den evidencia para respaldar y apoyar estudios locales acerca de los efectos sobre la salud y cuestiones morales del uso del asbesto en Colombia para fomentar la prohibición total del uso de este material y la remoción de este en los hogares colombianos. Entre otros usos secundarios, se puede destacar que también podría ayudar a identificar otro tipo de superficies, suelos, cubiertas en zonas de difícil acceso, analizar el crecimiento de comunidades en terrenos no permitidos y ejercer un mejor control sobre este tipo de actividades, entre otros. En general se destaca el poder generar el diseño de un sistema que permita identificar el asbesto, el cual pueda ayudar al gobierno, comunidades o a otras organizaciones interesadas, en conocer posibles ubicaciones de techos con asbesto y analizar la población que puede ser vulnerable, con el propósito de ejecutar acciones que ayuden a proteger la salud pública.

1. INTRODUCCIÓN

En Colombia, algunas comunidades han establecido su hogar con materiales de fibrocemento, algunos de estos materiales están compuestos de asbesto, muchos de ellos de fácil acceso y sin presentar una regulación adecuada. Las construcciones realizadas por la población en condición de vulnerabilidad, han llegado a implementar diversos materiales de dudosa calidad. En general, la construcción de estos hogares, más específicamente en los tejados de las viviendas, se ha hecho uso de materiales que pueden llegar a ser perjudiciales para la salud, debido a que algunos de estos son elaborados a base de asbesto. [6] La liberación de pequeñas partículas en el aire pueden ser nocivas para la salud, estas pueden ocasionarse al manipular el material o simplemente por el mismo desgaste que este sufre a partir del tiempo. [7]

El disponer materiales como el asbesto en los tejados, pone en riesgo la calidad de vida de las personas, estos pueden ser respirados sin que las personas lo noten por lo cual estas partículas se pueden alojar en los pulmones y acumularse, causando inflamación, cicatrices, entre otras afectaciones, en general estas producen serios problemas respiratorios y muchos de ellos con consecuencias a largo plazo. [8][9]

Teniendo en cuenta la anterior problemática, el objetivo de este trabajo consistió en desarrollar un sistema que ayudara a cuantificar el asbesto en edificaciones de una zona urbana determinada, de modo que este pueda ayudar a identificar determinados materiales de techos o superficies, específicamente, se requiere ofrecer un sistema con una serie de métricas que ayuden en ese proceso de detección. Con la información recolectada, se busca conocer el porcentaje de este material e incentivar la regulación de la producción y manipulación del asbesto como material de construcción, el cual según el comportamiento que se ha observado alrededor del mundo en los últimos años, se ha hecho evidente que puede ser nocivo para la salud. [6][7]

Este trabajo de grado definió una metodología para la identificación y clasificación del asbesto que se encuentra ubicado en las cubiertas de los techos de edificios, viviendas, bodegas, entre otros. Se espera que el sistema propuesto facilite la clasificación de este material mediante el uso de recursos informáticos y de esta manera detectar la presencia de asbesto en los techos de un sector determinado. Esto permitiría focalizar población vulnerable y generar información para las personas u organizaciones interesadas.

2. DESCRIPCIÓN GENERAL

Problemática y Oportunidad

A continuación se especifica la problemática y la oportunidad del trabajo de grado, en esta sección se mencionan los conceptos clave que fueron considerados.

Problemática:

En Colombia se ha hecho uso del asbesto en los últimos años, se puede destacar que algunas de las casas de fibrocemento contienen este material, no es una tarea sencilla identificar el asbesto de una manera rápida, precisa y segura. En general una identificación simple del asbesto requiere entrar en contacto con el material, por ejemplo se puede usar la microscopia óptica para confirmar manualmente la composición del material. Esta identificación puede ser peligrosa, debido a que sólo su manipulación puede desprender pequeñas partículas que al ser inhaladas pueden provocar problemas respiratorios y desencadenar complicaciones en la salud de las personas que están en contacto directo. La evaluación de una amplia zona puede desencadenar grandes barreras en cuestión de recursos humanos, logística, presupuesto y tiempo para abarcar todo un sector con el fin de realizar una identificación detallada y precisa.

Oportunidad:

La solución propuesta consiste en desarrollar un sistema para la identificación de materiales en los techos de las edificaciones o superficies, específicamente este sistema pretende ser una guía que permita identificar y cuantificar el asbesto. Al evaluar proyectos relacionados que busquen identificar este material, no se evidencia un caso en Colombia en el que se haya implementado una solución utilizando imágenes satelitales. Sin embargo, algunos trabajos relacionados de otros países si generan clasificaciones de asbesto a partir de imágenes hiperespectrales por lo cual se pueden considerar como soluciones similares, aunque en estos trabajos no se evidencia de una clara definición de una metodología que permita identificar y cuantificar este material.

Para la puesta en marcha del sistema se hizo uso de imágenes satelitales con el apoyo de la firma espectral del asbesto, para así poder facilitar la clasificación e identificación sobre las cubiertas de viviendas, edificios, bodegas, entre otras edificaciones comúnmente encontradas en sectores urbanos. Para el desarrollo de este trabajo de grado se estableció una metodología conformada por unas fases que consisten en la identificación de las imágenes, el procesamiento de estas mediante el software correspondiente, la construcción de un mapa de clasificación del asbesto, la integración de este con un sistema de información geográfica y la construcción de una interfaz de consulta que permita a los usuarios observar la mejor clasificación generada.

3. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO

A continuación se describen los objetivos principales del trabajo de grado, junto a su relación de la fase de desarrollo propuesta.

3.1 Objetivo general

Diseñar y validar un sistema que permita identificar y cuantificar el asbesto de superficies o cubiertas de un área determinada.

3.2 Objetivos específicos

- Realizar una investigación preliminar que permita identificar las principales variables involucradas.
- Analizar la información y el establecimiento de los principales requerimientos.
- Diseñar el sistema.
- Construir el mapa de clasificación.
- Implementar el sistema.
- Validar que la implementación de la propuesta pueda satisfacer los requerimientos establecidos.

3.3 Fases de desarrollo

En el desarrollo del trabajo de grado se pretende diseñar y aplicar un sistema que ayude a identificar y cuantificar el asbesto, este parte de una fase inicial investigativa, para continuar con el diseño e implementación. A continuación, se destacan las principales fases para el desarrollo del proyecto:

3.3.1 Fase metodológica 1- Investigación preliminar

En esta fase se realizó una investigación preliminar resaltando los trabajos relacionados más relevantes a nivel nacional e internacional, se destacaron las soluciones con mejores resultados en cuanto a la identificación del asbesto y los resultados obtenidos de la clasificación por medio de imágenes satelitales en el procesamiento mediante una serie de algoritmos especializados. Esta fase permitió generar el marco contextual del trabajo de grado, y como entregables se resalta un documento con la investigación preliminar del marco conceptual (ver [Anexo I – Investigación preliminar](#)) y un artículo con el estado del arte ([Anexo II](#)) titulado “*Uso de imágenes satelitales para detección y cuantificación de asbesto*” sometido a publicación en la revista DYNA, el cual menciona los proyectos similares a nivel nacional e internacional. Esta sección se consolidará y se especificará con más detalle en la [sección 4. Estado del arte](#).

3.3.2 Fase metodológica 2 - Análisis

Esta fase inicia a partir de los resultados obtenidos en la fase 1, en la cual se analiza e identifica los principales elementos conceptuales y sus relaciones, con base a esto se procedió a establecer

los requerimientos y características esenciales que deberá tener en cuenta el diseño del sistema propuesto (ver [Anexo III – Requerimientos](#)). También se establecen las condiciones técnicas necesarias, en el cual se destaca la selección previa del área a trabajar y el establecimiento de restricciones y condiciones del sistema. Esta sección se especificará con más detalle en la [sección 5.2 Condiciones y restricciones del sistema propuesto](#).

3.3.3 Fase metodológica 3 - Diseño

A partir de las condiciones y restricciones definidas en la fase dos, se establecen los principales criterios para el diseño del sistema. Entre ellos se consolidan los principales aspectos relacionados con la eficiencia, su funcionalidad y su facilidad de uso. Una vez establecidos estos criterios se procede a realizar una búsqueda de alternativas que permitan satisfacerlos, y posteriormente definir el diseño de una arquitectura más detallada del sistema. Esta sección se especificará con más detalle en la [sección 5.2 Condiciones y restricciones del sistema propuesto](#).

3.3.4 Fase metodológica 4 - Construcción

Esta fase consiste en la implementación del sistema a partir del diseño propuesto. Para la construcción del sistema es necesario considerar una estrategia de integración de todos los elementos propuestos en el diseño, con el fin de conseguir cumplir con las características esperadas. Para ello es necesario considerar elementos relacionados con el software, el hardware, los datos, los procedimientos, y el personal involucrado con la operación del sistema.

En general se establece el procesamiento de las imágenes mediante el uso de software que cumpla las condiciones establecidas con el propósito de generar la construcción del mapa de clasificación, la integración a un sistema de información geográfico y la construcción de una interfaz de consulta que facilite la interacción con el sistema. En general esta fase considera distintas herramientas de software, con el fin de seleccionar las que mejor se adecuen a las condiciones y criterios establecidos inicialmente.

3.3.5 Fase metodológica 5 - Validación

Esta fase tiene por objetivo validar el sistema propuesto mediante una prueba piloto en un área seleccionada. Posteriormente se realiza un análisis de los resultados obtenidos con el fin de verificar y contrastar el levantamiento de información hecho en campo, contra los resultados obtenidos al implementar el sistema propuesto. Se espera de esta manera evaluar la eficiencia de la identificación y clasificación del asbesto. Esta sección se especificará con más detalle en la [sección 5.3.6. Validación](#).

4. ESTADO DEL ARTE

Con el fin de identificar los principales estudios que dan cuenta del uso de imágenes espectrales para detección de asbesto en materiales, sus métodos, herramientas y limitaciones; se realizó una revisión de literatura en Web of Science y Scopus sin límites de fecha o idioma, en donde se definieron como palabras clave: “asbestos”, “spectral signature”, “hyperspectral”, “hyperspectral image” y “hyperspectral remote sensing”.

Posteriormente se realizó una identificación de las principales variables a tener en cuenta en los distintos estudios e investigaciones, con el fin de priorizar aquellas que tuvieran mayor incidencia en la pregunta generadora del proyecto de investigación. ¿Es posible identificar a partir de imágenes satelitales, las cubiertas de edificaciones urbanas que contienen materiales con asbesto?

Se realizó una revisión general de artículos identificados en ambos índices y se descartaron algunos documentos por centrarse en aspectos químicos o biomoleculares para la detección de firmas espectrales más allá de concentrarse en el uso y resolución de imágenes hiperespectrales que es el centro de la revisión de la investigación. Se seleccionaron los artículos más relevantes en el uso de imágenes satelitales para la identificación del asbesto y se analizaron exhaustivamente.

A continuación se mencionaran los principales criterios más representativos de los proyectos relacionados, los cuales se refieren a la firma espectral, el uso de imágenes multiespectrales y en la resolución de estas, haciendo énfasis en la identificación de materiales en una zona urbana y destacando la clasificación del asbesto.

4.1. Firmas espectrales

En la búsqueda de información de proyectos relacionados con la identificación y clasificación de asbesto en Colombia, no se evidencian proyectos concretos en donde se propongan metodologías para identificar y clasificar zonas con asbesto utilizando imágenes satelitales. Sin embargo, existen algunos estudios que demuestran que si hay un particular interés por trabajar en este tipo de retos, tal y como se menciona en el artículo *Aplicaciones y retos del sensado remoto hiperespectral en la geología Colombiana*. [10] En este estudio se identificó el mineral denominado nontronita mediante Sensado Remoto (SR) que es una técnica para adquirir información sobre un objeto o fenómeno sin hacer contacto físico con él.

Para la evaluación de la capacidad de extraer información espectral de las Imágenes Hiperespectrales (HSI) para uso en la geología Colombiana se solicitó al centro de vuelos espaciales Goddard de la NASA, la adquisición de una imagen del departamento de Santander, Colombia, más exactamente el caso de estudio se localizó en el municipio de Girón. En este caso en particular se observaron pequeñas irregularidades, con algunas diferencias con respecto a los resultados obtenidos de las HSI capturadas entre el valor de reflectancia registrado por el sensor a la reflectancia real, debido a factores como el ángulo del sol, la altitud y condiciones atmosféricas, motivo por el cual fue preciso realizar actividades de procesamiento como correcciones radiométricas y eliminación de bandas con baja relación (señal y/o ruido) para lo

cual se aplicó la herramienta de calibración radiométrica del software *ENVI*. Al final de este procedimiento se extrajeron las firmas espectrales de la imagen, identificando los píxeles objetivo para luego realizar una salida de campo y verificar la “verdad de terreno”. Se detectaron espectros similares a la firma espectral del mineral, el cual puede tener distintas tonalidades de color.

El estudio *Hyperspectral discrimination of asbestos-cement roofing realizado en el este del centro de la ciudad de Munich en Alemania* [11], se realizó la discriminación hiperspectral de techos de fibrocemento por medio de las características del espectro, mediante la identificación de las curvas de reflectancia. El análisis de curvas de reflectancia espectral fue realizado en el software *ENVI 5.0* con el uso del *Spectral Angle Mapper*. Para cada firma espectral desconocida. Además, la firma espectral desconocida se comparó en cada longitud de onda seleccionada usando *Mínimos Cuadrados* y el Error de la Raíz cuadrada Media (RMS) se determinó para cada espectro. Al evaluar los resultados, los píxeles con alta escala y bajo RMS se consideraron coincidentes, es decir que son significativamente similares.

4.2. *Uso de imágenes hiperspectrales en la detección de asbesto*

El estudio húngaro publicado en 2014 titulado *Testing Algorithms For The Identification Of Asbestos Roofing Based On Hyperspectral Data* [12], buscó identificar diferentes tipos de techos y determinar aquellos con componentes de asbesto usando imágenes hiperspectrales de alta resolución (1m) y espectral (126 bandas) (*AISA Eagle II*) con varios enfoques de clasificación mediante la prueba de algoritmos de clasificación. El análisis de las imágenes se realizó utilizando el Software *ENVI + IDL 4.8*, debido a que los tipos de techos podían ser identificados visualmente y corroborados en los resultados. También se intentaron identificar las longitudes de onda que facilitan la distinción de los diferentes tipos de materiales en los techos. El estudio concluye que los algoritmos *SAM* (Mapeador de ángulos espectrales o *spectral angle mapper* por sus siglas en inglés), los métodos de clasificación *MLC* (Métodos de máxima verosimilitud o *Maximum Likelihood* por sus siglas en inglés) y *SVM* (Máquina de vectores de soporte o *Support vector machine* por sus siglas en inglés), los cuales generaron una precisión superior al 85% en la evaluación y detección de asbesto en diferentes tipos de techos.

Un trabajo relevante para la investigación, porque parte de una problemática muy similar a la planteada, fue el desarrollado en Italia bajo el título *Mapping of Asbestos Cement Roofs and Their Weathering Status Using Hyperspectral Aerial Images* [13], allí se destaca la importancia de las firmas espectrales para generar una clasificación de materiales mediante el uso del algoritmo *SAM* que al ser entrenado para generar una imagen satelital a través de un conjunto de píxeles seleccionados permite visualizar el asbesto y otros materiales en zonas urbanas delimitadas. Los investigadores, de manera previa a la realización de la clasificación, establecieron una zona de identificación en un sitio en donde los techos contenían una cubierta de asbesto, para entrenar al algoritmo en la identificación. El estudio titulado *Mapping asbestos-cement roofing with the use of APEX hyperspectral airborne imagery realizado en*

Karpacz, Polonia [14], también evidencia la necesidad de realizar una rigurosa identificación previa de las edificaciones para que el análisis con las imágenes hiperespectrales proporcione datos con suficiente precisión en el mapeo del asbesto utilizando el algoritmo SAM.

El artículo titulado *Asbestos containing materials detection and classification by the use of hyperspectral imaging* [6] realizado en 2017, en Roma Italia contó con muestras de asbesto puro. Con el propósito de detectar este material en los techos de casas o edificaciones, se aplicaron sistemas basados en imágenes hiperespectrales (HSI) los cuales se destacan por ser utilizados ampliamente en la teledetección mediante satélites, plataformas aéreas y drones, para medir y mapear aspectos específicos del territorio, en estos se incluyen la presencia de materiales peligrosos, como las fibras de asbesto en áreas rurales, montañosas, industriales y urbanas. En el estudio se establecieron y utilizaron múltiples estrategias de modelado para detectar techos de asbesto, aunque tuvieron cierto tipo de limitaciones como la falta de bibliotecas espectrales adecuadas para los materiales urbanos y con la dificultad de lidiar con presencia de sombras que generan similitudes espectrales, entre otros factores, se logró la identificación de asbesto con los métodos propuestos.

Uno de los ejemplos prácticos de la tecnología hiperespectral es el estudio *Development and utilization of urban spectral library for remote sensing of urban environment* [15]. En este se llevó a cabo el desarrollo de una biblioteca espectral de materiales urbanos, el cual es un ejemplo que demuestra la aplicación práctica de la teledetección en un entorno urbano. La tecnología hiperespectral ha sido útil debido a la capacidad de examinar características espectrales detalladas de los materiales. Este caso de estudio fue publicado en el 2011 y se centró en una región específica del área urbana del campus principal de la *Universiti Putra Malaysia (UPM)*, las mediciones de campo se realizaron utilizando un espectrómetro, con un rango de longitud de onda de 350nm a 2500nm. Además, se utilizó una imagen satelital de WorldView-2, en donde se hizo la clasificación mediante el algoritmo SAM partiendo del uso de datos de referencia de la biblioteca espectral, los datos consolidados fueron interpretados y de estos se analizaron las curvas de reflectancia espectral de los materiales urbanos encontrados, los cuales arrojaron una colección de alrededor de 22 datos espectrales los cuales fueron compilados en una biblioteca espectral.

La figura 1 muestra el comportamiento del asbesto y cómo varía un poco debido al proceso de envejecimiento. En esta imagen se muestra el comportamiento del asbesto en cuanto a la radiación en función de la longitud de onda reflejada.

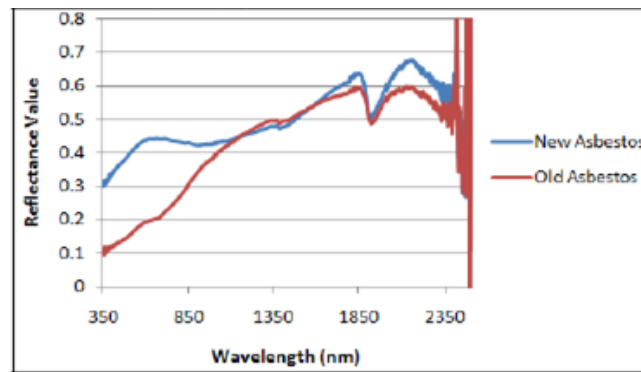


Figura 1. Radiación reflejada en función de la longitud de onda [15].

Se puede analizar que las firmas espectrales tanto del asbesto nuevo, como el asbesto viejo tienen un comportamiento similar excepto en la región de onda del espectro visible.

Otro ejemplo de aplicación práctica en los entornos urbanos es considerar el estudio de *Methodologies to identify asbestos-cement roofing by remote data* [16], desarrollado en una área en la provincia Reggio Calabria al sur de Italia, en este se realizó la identificación mediante sensores remotos, el uso de estos permitió reducir el tiempo en los costos del censo de los techos de asbesto. El uso de técnicas de transformación con imágenes hiperespectrales de alta resolución espacial permitió también mejorar la calidad de imagen reduciendo el ruido de estas, es decir, permitió discriminar otros materiales con la técnica de fracción mínima de ruido (*Minimum Noise Fraction* o por sus siglas MNF). Las técnicas de teledetección han permitido que las herramientas de identificación y clasificación sean más precisas, en el momento de monitorizar un territorio en específico, para este proyecto se redujeron el tiempo y los costos del censo de los techos de asbesto.

El uso de imágenes satelitales proporciona un acceso a mucha careacteristicas sobre el terreno y esta información facilita realizar un proceso de clasificación, la aplicación de índices espectrales y de técnicas de fusión de imágenes que pueden ayudar a identificar materiales. En el artículo: *Detección de zonas mineras a cielo abierto aplicando índices espectrales y técnicas de fusión de imágenes* [17], se hace uso de este las imágenes para identificar zonas mineras por la técnica de fusión de trasformación de Brovery en la banda 2, para la detección de ciertos tipos de minerales.

4.3. La resolución de las imágenes

El uso de imágenes multiespectrales para la clasificación de materiales puede ser apoyado con el soporte de los rasgos geométricos y de textura para mejorar la exactitud obtenida de la clasificación. Este nuevo enfoque puede dar una base para mejorar la definición de ésta, el cual es mencionado en el artículo: *Un nuevo enfoque para la clasificación de imágenes multiespectrales basado en complejos cartesianos*, en el que se definen una serie de fases que contemplan la transformación de imágenes para generar una mejor clasificación [18]. Esta

metodología provee un guía de cómo pueden procesarse las imágenes para generar mejores resultados en la clasificación gracias a la mejora de la resolución de los píxeles.

En el artículo *A QGIS Tool for for Automatically Identifying Asbestos Roofing* [19], realizado en Prato Italia en el 2019, se hace mención a una herramienta basada en el software de código abierto del sistema de información QGIS, como una herramienta diseñada para identificar automáticamente edificios con techo de asbesto. El área de prueba bajo esta investigación fue el área metropolitana alrededor de Prato, Italia. Esta herramienta usa imágenes clasificadas que fueron adquiridas por el sensor WorldView-3. En este se aplicó la clasificación por píxel para la identificación de varios materiales, teniendo como principal objetivo la identificación del asbesto.

Es importante considerar la resolución de los píxeles para procesar la información. En el artículo *Mapping Asbestos-Cement Roofing with Hyperspectral Remote Sensing over a Large Mountain Region of the Italian Western Alps* [20], se hace mención a un estudio realizado en la Región Autónoma del Valle de Aosta, que tiene un área de 3263 km² y se ubica en el noroeste de Italia. En este estudio se determinó la importancia de la resolución de los píxeles y su relación con tamaño del techo en el cual se identificó, mediante una validación detallada, que los píxeles de imagen de 3 × 3 soportan un procesamiento adecuado para una buena detección del asbesto.

Para una mejor calidad de los datos generados se tendría que considerar imágenes con una resolución adecuada, una resolución de baja calidad podría limitar la clasificación o la identificación del asbesto, en el artículo *Deterioration status of asbestos-cement roofing sheets assessed by analyzing hyperspectral data* [21], se hace mención a las posibles limitaciones en el uso de datos de detección remota de bajo costo, lo cual se debe principalmente a una resolución espacial inadecuada (al tamaño de píxel), lo que crea conflictos para resolver pequeños componentes de estructuras, como lo son los techos en situaciones complejas en donde se pueden sobreponerse los materiales.

El diseño y la implementación de una metodología pueden ayudar a efectuar una identificación del asbesto. Se requiere encontrar unas fuentes de información como la fotografía aérea y/o las imágenes satelitales, que permita efectuar un procesamiento que genere una clasificación del material para finalmente evaluar los resultados obtenidos. Un ejemplo práctico fue la metodología usada en el artículo *Detection of asbestos-containing materials in agro-ecosystem by the use of airborne hyperspectral CASI-1500 sensor including the limited use of two UAVs equipped with RGB cameras* [22], en el cual se menciona el uso de datos preliminares y el procesamiento de imágenes que generan como resultados la identificación y clasificación del asbesto en un contexto de agroecosistema, más exactamente se refiere a la identificación del asbesto abandonado en la naturaleza, el cual se ha mezclado con diferentes tipos de residuos. Este procedimiento se aplicó en la región de Apulia en abril de 2015 sobre un área de prueba del sur de Italia.

A nivel internacional se han realizado esfuerzos desde las políticas gubernamentales para establecer medidas con el fin de proteger a las personas expuestas al asbesto, un ejemplo es el mencionado en el artículo *Carbonate-hosted asbestos occurrences in South Australia: review*

of geology and implications for mesothelioma [23], en donde se analiza el asbesto en un entorno natural y se menciona que, a partir del conocimiento geológico es posible identificar minas de asbesto. Este tipo de estudios permite a los gobiernos tener información sobre lugares que pueden tener áreas potencialmente peligrosas para los seres humanos.

Conclusiones

En general las clasificaciones de las imágenes de los materiales urbanos fueron llevadas a cabo utilizando el mapeador de ángulos espectral (*SAM*) y algoritmos de Máxima Verosimilitud (*ML*) que ayudan en la clasificación de firmas superpuestas, en la que los píxeles tienen una importancia considerable y los cuales son asignados a la clase de mayor probabilidad al realizar la identificación.

Se puede destacar que la mayoría de estas estrategias implementadas en la identificación del asbesto se centran en un aspecto técnico, es decir, en aplicar algoritmos, entre los más populares está el *SAM*, entre otros relacionados con *Machine Learning*. *No se evidencia el uso de una serie de procedimientos que permitan establecer una clasificación del asbesto*, sin embargo, se hace mención a una metodología, esta puede servir como referencia y apoyo en el momento de generar y aplicar una propia en el entorno nacional, en la que se agrupe los recursos necesarios para llegar a la clasificación esperada. Se puede destacar el uso de imágenes satelitales, fotografía aérea, aplicación de software, entre otros, para realizar la clasificación, algunos de estos recursos son primordiales para poder efectuar la identificación y clasificación del asbesto. En el [Anexo I - Investigación preliminar](#) y en [Anexo II – Uso de imágenes satelitales para la detección y cuantificación del asbesto](#), se hace mención y analizan con más profundidad los resultados obtenidos y los conceptos más relevantes que ayudan a establecer una metodología para la identificación del asbesto.

5. MATERIALES Y MÉTODOS USADOS

En este capítulo se presentará los elementos esenciales para realizar la clasificación del asbesto. Se hará mención a un procedimiento metodológico que contemple las necesidades básicas para el funcionamiento del sistema.

5.1 Selección del área a trabajar

Siguiendo la fase uno de la metodología propuesta, se empezó a determinar las posibles zonas para la identificación del asbesto. En esta búsqueda inicial se realizó una investigación de la ubicación de algunos de los barrios de la localidad de Usme. En esta selección, se determinó que el programa social de la facultad de Ingeniería *PROSOFI* mantenía un contacto directo con la comunidad de Usme y a partir de los censos realizados el programa social *PROSOFI* contaba con información de las cubiertas de las edificaciones de la zona. Conociendo esta información, se realizó una visita a los sectores que aparecían con registros de cubiertas de tejas de fibrocemento que contienen dentro de sus componentes asbesto, para verificar que los registros efectivamente correspondían a sus descripciones y se hizo una observación preliminar del sector.

Al hablar con los habitantes del sector especificaron que sus casas tenían una cobertura de asbesto en los tejados, por lo cual al tener una evidencia de que estas casas contaban con este material, se hizo un reconocimiento más detallado del barrio *Ciudadela Boloña* del sector de Usme, mediante la toma de fotografías aéreas desde un dron *Mavic Pro 2* como se puede evidenciar en la figura 2.



Figura 2. Uso del dron en Compostela 2, Usme

El uso del dron ofrece un ahorro de tiempo de trabajo de campo debido a que proporciona una mayor inspección visual sobre el terreno y permite hacer un reconocimiento más amplio de la zona. En la metodología propuesta no es necesario el uso de drones para el reconocimiento inicial de la zona. En este caso en particular, fue utilizado con el fin de mejorar la validación de la clasificación que posteriormente se iba a desarrollar con la imagen satelital. Para detallar más información sobre la salida de campo ver el [Anexo IV– Fotografía aérea](#).

Como resultado del trabajo de campo se tomaron algunas fotografías panorámicas (aproximadamente 22) y un total de 350 fotografías verticales (ver [Anexo IV - Fotografía Aérea](#)) a una altura de 2952 metros con un GSD de 80.92 cm.



Figura 3. Fotografía panorámica del sector de Usme

Con base a las primeras fotografías aéreas panorámicas, el reconocimiento del sector y por sugerencias de los habitantes, se determinaron tres áreas para realizar la toma de fotografías verticales. Esta selección se realizó teniendo en cuenta los sectores que tenían una mayor cobertura de tejas de asbesto. En la figura 4 se puede observar el recorrido realizado por el drone en el barrio Compostela 2.

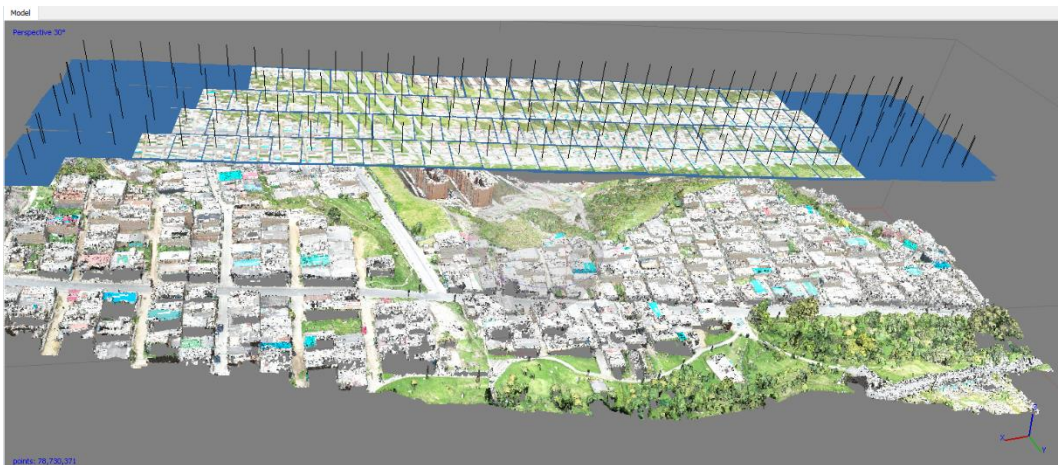


Figura 4. Recorrido realizado en el barrio Compostela 2, Usme

5.2 Condiciones y restricciones del sistema propuesto

Considerando la metodología propuesta, la fase dos establece las condiciones y restricciones del sistema. Para ello, se tomaron en cuenta ciertos criterios de diseño que debe cumplir el sistema para garantizar el cumplimiento de su objetivo.

5.2.1. Condiciones generales

El sistema propuesto está basado en una concepción holística de un sistema, es decir, está considerando los principales elementos que lo conforman y sus relaciones en un conjunto de subsistemas funcionando entre sí, como una integración de partes para generar los resultados esperados.

La metodología propuesta busca reunir todas estas partes con el fin de lograr el objetivo propuesto, en este caso particular es la identificación de cubiertas que contengan asbesto. Este conjunto de subsistemas busca facilitar su diseño y posterior comprensión. En general, el sistema ha sido concebido como la interrelación de cuatro subsistemas, cada uno de ellos orientado a cumplir una finalidad específica.

Los subsistemas deben integrar múltiples elementos de procedimientos, software, hardware, datos y personal capacitado para operar. La figura 5 presenta la propuesta general del sistema y de los subsistemas.



Figura 5. Propuesta de sistemas y subsistemas para la clasificación de asbesto.

5.2.1.1. Subsistema de Entrada de datos

Este subsistema tiene por objetivo facilitar la descarga de información necesaria para realizar la clasificación del asbesto de las imágenes satelitales. Para ello es necesario que las personas encargadas de administrar este subsistema tengan un conocimiento sobre bancos de imágenes satelitales y el correspondiente sistema de referencia utilizado para localizar las áreas de interés y los criterios para seleccionar una imagen con bajo porcentaje de nubosidad, fechas adecuadas al momento del análisis, costos, resolución espacial, resolución radiométrica, resolución espectral y resolución temporal.

Este subsistema requiere herramientas de software que permitan identificar y descargar las correspondientes imágenes satelitales. Normalmente estas aplicaciones de software exigen condiciones particulares de hardware para su correcta ejecución.

5.2.1.2. Subsistema de Almacenamiento de datos

Una vez han sido identificadas y descargadas las imágenes satelitales, es necesario almacenarlas en un formato adecuado al software de procesamiento de imágenes que se esté utilizando. Generalmente es necesario organizar un repositorio de las imágenes con las bandas espectrales seleccionadas. Es importante destacar el conocimiento acerca de las bandas, debido a que estas aportan la información de reflectancia de longitud de onda, lo cual es clave para la identificación del asbesto.

Las imágenes satelitales de los bancos de imágenes generalmente cubren una gran superficie que puede abarcar hasta 100 km² aproximadamente, es importante delimitar esta imagen generando un recorte adecuado sobre la superficie a identificar. El recorte debe realizarse sobre el sector de interés, para ello es necesario ubicar y seleccionar la zona sobre la cual se tenga información de cubiertas que poseen asbesto. Es recomendable seleccionar un área que no supere los 5 km² para evitar que el procesamiento de la imagen tome demasiado tiempo o exija un recurso computacional considerable, aunque el experto será el encargado de delimitar esta zona dependiendo del área de interés y los recursos computacionales disponibles.

Para la identificación del asbesto según las investigaciones y trabajos relacionados, (ver [Anexo I](#) y [Anexo II](#)), se puede determinar una clasificación del asbesto con un radio de onda de 350nm a 2500nm. Las bandas que generaran mejores resultados para resaltar el asbesto de las zonas urbanas son las 8 bandas del infrarrojo de onda corta “SWIR”, por lo que es recomendable trabajar con o cerca a estas bandas para realizar una adecuada clasificación, teniendo en cuenta el comportamiento en función de longitud de onda del asbesto.

5.2.1.3. Subsistema de Análisis de los datos

Este subsistema tiene como objetivo realizar el procesamiento de las imágenes satelitales. Esto implica tomar las bandas seleccionadas del recorte del área de interés, calcular los histogramas, y si se desea ver las características de la imagen, realizar la caracterización estadística de cada una de las bandas con el fin de cualificar la información de cada banda. Posteriormente, es necesario realizar el proceso de composición de color, en donde se resalte las áreas de entrenamiento que se utilizaran en el algoritmo de clasificación. En este subsistema se

contempla a partir de la zona de interés delimitada y seleccionada la ejecución y procesamiento de imágenes satelitales. Este subsistema es uno de los más relevantes debido a que este generará los resultados que permitirán descubrir si en la zona de estudio hay o no cubiertas de asbesto.

Para realizar la localización de las cubiertas que contienen asbesto es necesario seleccionar ejemplos de las clases con información de sitios de interés, es decir, en este caso en particular, se seleccionará el asbesto de las cubiertas previamente identificadas mediante la delimitación de un polígono sobre la imagen que corresponde al sector identificado presencialmente con asbesto, esto con el propósito de establecer este sector como una zona de entrenamiento para el algoritmo, que posteriormente utilizará el software encargado de realizar la clasificación.

La generación de polígonos tomando muestras de zonas con cobertura de asbesto, es la base para realizar una caracterización estadística, la cual determina unos puntos de muestreo para posteriormente llevar a cabo una búsqueda de patrones similares, para finalmente realizar un proceso de validación en donde se determina la cantidad de material clasificado y se analiza si está en un rango aceptable, lo cual determina la exactitud de la clasificación del asbesto. Estos polígonos de entrenamiento son utilizados por diferentes tipos de algoritmos de clasificación supervisada.

5.2.1.4. Subsistema de Integración con un SIG (Sistema de información Geográfico)

Considerando los resultados generados de la clasificación se necesita un subsistema que permita poder visualizar los resultados obtenidos, esto con el propósito de analizar los valores que generó el subsistema de análisis de datos. El subsistema de integración será encargado de representar los resultados sobre un mapa geográfico, en el mapa se resaltará con colores cada clase identificada, en donde se representa en capas los resultados del clasificador y se destacará la clasificación del asbesto. La integración con un *SIG* recolectará la información de los atributos más relevantes para analizar y se deberá establecer con acceso público para que los usuarios con conocimientos en *SIG*, que pertenezcan a la organización, puedan acceder a la información publicada.

5.2.2. Condiciones de funcionamiento

Para que el sistema de clasificación de asbesto funcione correctamente deberá contar con unas capacidades mínimas que permitan el funcionamiento de los subsistemas mencionados anteriormente. Para el procesamiento de imágenes satelitales se deben cumplir las siguientes condiciones:

5.2.2.1. Imagen satelital

La obtención de la imagen satelital es fundamental para el procesamiento. Si la identificación del asbesto hace parte de un proyecto con acceso a un presupuesto económico, es recomendable utilizar estos recursos para realizar una solicitud de la imagen satelital a una empresa proveedora, en la cual se haga referencia a una imagen de una zona sin nubosidad, con 8 bandas, que incluyan en infrarrojo cercano y con una alta resolución espacial (de alrededor de 2m para las 8 bandas), se debe administrar el tiempo de la solicitud, debido a que el pedido de la imagen

puede tomar varios días en ser efectuado. Sin embargo, si la identificación del asbesto no hace parte de un proyecto con un presupuesto económico que lo respalde, también se puede solicitar a través de un banco de imágenes satelitales de manera gratuita (aunque la calidad de esta imagen puede estar limitada). Entre los repositorios más importantes se destaca el de *USGS* (*United States Geological Survey*), disponible en <https://glovis.usgs.gov/app>. Este es un banco de imágenes satelitales de diferentes satélites, se debe tener una cuenta registrada para solicitar la imagen deseada (ver Figura 6).

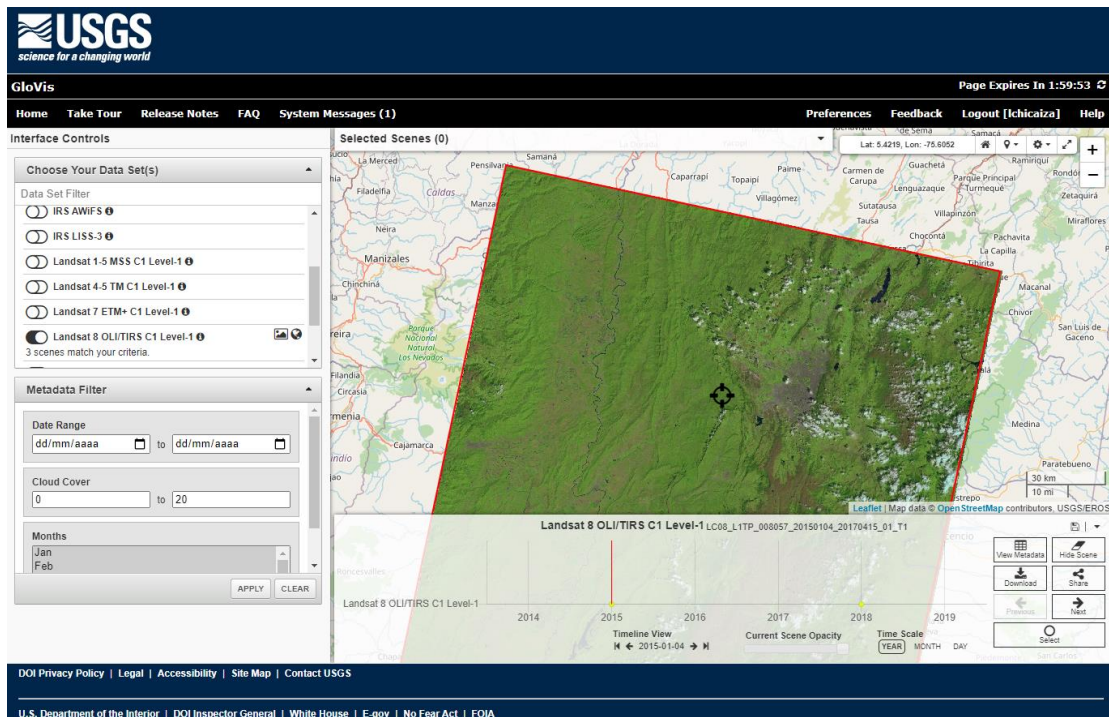


Figura 6. Interfaz de consulta USGS.

Este permitirá descargar un archivo en formato *Geotiff* comprimido de alrededor de 1GB de peso, con la información del sector solicitado representado en las imágenes satelitales con múltiples bandas. Es recomendable que sea del satélite *Landsat 8*, debido a que es de los más recientes satélites operados por la *NASA* (*Administración Nacional de Aeronáutica y el Espacio*) y el *USGS* (*Servicio Geológico de los Estados Unidos*).

5.2.2.2. Condiciones de hardware

Este sistema debe poder ejecutarse en un sistema operativo de Windows, el cual es compatible con la mayoría de herramientas de procesamiento de imágenes satelitales. Las herramientas deben ofrecer la carga de imágenes satelitales, procesamiento y generación de resultados. Se recomienda un computador con una memoria *RAM* de 1 GB o superior, con al menos 4 procesadores, con un *Intel core i5* de 7ma generación o superior, o *AMD Ryzen 5* o superior, esto con el objetivo de que el sistema se pueda ejecutar sin menores contratiempos, en un tiempo de ejecución óptimo en el cual el sistema pueda realizar las operaciones básicas en un

tiempo no mayor a 35 segundos y las operaciones de procesamiento en un tiempo no mayor a 5 minutos (ver [Anexo III- Requerimientos](#)).

5.2.2.3. Condiciones de software

El software debe suministrar una serie de herramientas indispensables para editar la imagen satelital, mejorar su contraste, calcular elementos estadísticos de cada banda, realizar filtros para resaltar u ocultar características deseadas, hacer transformaciones de la imagen, y finalmente aplicar diferentes algoritmos de clasificación supervisada.

La metodología propuesta es independiente del software seleccionado para realizar el procesamiento de la imagen satelital. Es importante que el personal encargado en seguir el procedimiento, analice previamente si las capacidades ofrecidas por el software contienen las herramientas mencionadas anteriormente.

Cabe resaltar que mediante un área de estudio establecida, el software a partir de una imagen satelital debe generar clases en función a una serie de variables, es decir, debe generar áreas de entrenamiento que servirán para crear una firma espectral característica de cada clase, esto permitirá diferenciar el asbesto de otros materiales.

5.2.2.4. Conocimientos necesarios para operar el sistema

Es necesario contar con una persona o un equipo con los conocimientos básicos en sistemas de información geográfica y procesamiento de imágenes satelitales, además de conocer las funcionalidades básicas del software elegido. Esto con el objetivo de que la información proporcionada sea fácilmente interpretable.

Dentro de los aspectos más relevantes, se destaca que la persona en seguir la metodología debe contar con los conocimientos básicos para establecer zonas de entrenamiento, en donde se haga el uso del software elegido para realizar la clasificación supervisada. Se debe tener en cuenta aspectos como el tamaño de la muestra en el polígono, la selección de una imagen con una buena resolución y también conocer la forma de delimitar las áreas de entrenamiento en la imagen satelital, lo anterior como principales criterios con el fin de realizar una adecuada identificación del asbesto.

Para el uso del software que permita realizar múltiples clasificaciones supervisadas, se deben conocer los elementos básicos que deben implementarse en cada algoritmo, los cuales se efectuarán a partir de los polígonos delimitados previamente, entre otras métricas que se encontrarán en el momento de efectuar la clasificación.

5.2.3. Restricciones generales del sistema

Para la ejecución óptima de los subsistemas, se determinó una serie de restricciones que limitan su correcto funcionamiento. Estas limitantes fueron identificadas a partir de la experimentación con las condiciones anteriormente establecidas. El no tener en cuenta estas restricciones puede afectar el desempeño del sistema.

Las principales restricciones identificadas son las siguientes:

- Baja resolución de la imagen satelital.
- Baja capacidad de procesamiento y despliegue gráfico del computador.
- Limitantes en los algoritmos implementados en el software de procesamiento de imágenes.

Estos aspectos influyen directamente en los resultados generados, la resolución de las imágenes es muy importante, si no son lo suficientemente detalladas, no se podrá generar una clasificación adecuada. La capacidad de cómputo es importante: en la ejecución de los subsistemas los programas consumen alrededor de 1GB de memoria RAM por lo que es necesario contar con una máquina con esta capacidad de procesamiento o mayor, si no se cumplen las condiciones de hardware y de software mencionados anteriormente, las herramientas de procesamiento tendrán problemas en ejecutar los algoritmos de clasificación y procesamiento de la información, se puede bloquear la máquina y cerrarse al ejecutarse. El programa para procesar las imágenes deberá permitir el uso de técnicas de clasificación supervisadas.

5.3 Procedimiento metodológico propuesto

El sistema de clasificación de asbesto está basado en un proceso metodológico que pretende ayudar al personal encargado de operar el sistema a organizar las diferentes actividades que se deben desarrollar en cada uno de los subsistemas.

A continuación, se describen los pasos del procedimiento metodológico establecido para realizar un correcto uso del sistema y de los elementos que lo componen:

5.3.1 Selección de imagen satelital

Con el propósito de realizar una correcta clasificación es indispensable contar con una imagen satelital de la zona de interés, este es uno de los insumos principales requeridos para este procedimiento, también es importante conocer previamente el área donde se realizará la clasificación.

Se recomienda que la identificación inicial de la zona sea a partir de una salida de campo en la que se inspeccione el sector, si esto no es posible, se deberá disponer un conocimiento de la información geográfica de la zona, este procedimiento se hizo mención en la [sección 5.1. Selección del área a trabajar](#). Estos serán los componentes básicos en el subsistema de entrada de datos en el cual el personal encargado de operar el sistema debe descargar la imagen satelital para empezar el procedimiento.

5.3.2. Identificación del sector en la imagen satelital

Es necesario conocer el sector en donde se realizará la clasificación, se sugiere que este sea a partir de la fotografía aérea y/o de una salida de campo realizada previamente. La salida de

campo y el reconocimiento inicial de la zona facilitará la identificación de la zona en la imagen satelital para realizar una delimitación adecuada. Se recomienda seleccionar una distancia de alrededor de 2 km² sobre la zona de interés, la cual será la base para realizar más adelante un entrenamiento de clasificación en el subsistema de análisis de datos.

5.3.3. Generación de la subimagen a trabajar

El siguiente paso inicia con el procesamiento de un sector específico identificado previamente en la sección anterior. Es importante resaltar, que se debe considerar los recursos computacionales para hacer el procesamiento de las imágenes, es importante limitar el tamaño de la imagen, dado que el procesamiento consume alrededor de 1GB de RAM en su ejecución (como promedio en un software de clasificación ejecutado), si una imagen es demasiado grande (de más de 50 km² aproximadamente, ver figura 7), puede inferir en el tiempo que toma el programa en ejecutar los algoritmos de clasificación. El recorte de la imagen permite una mejoría en tiempo de ejecución y de los resultados generados. Estos serán el insumo básico en el subsistema de almacenamiento de datos (se recomienda un recorte de alrededor de 2 km² o menos).

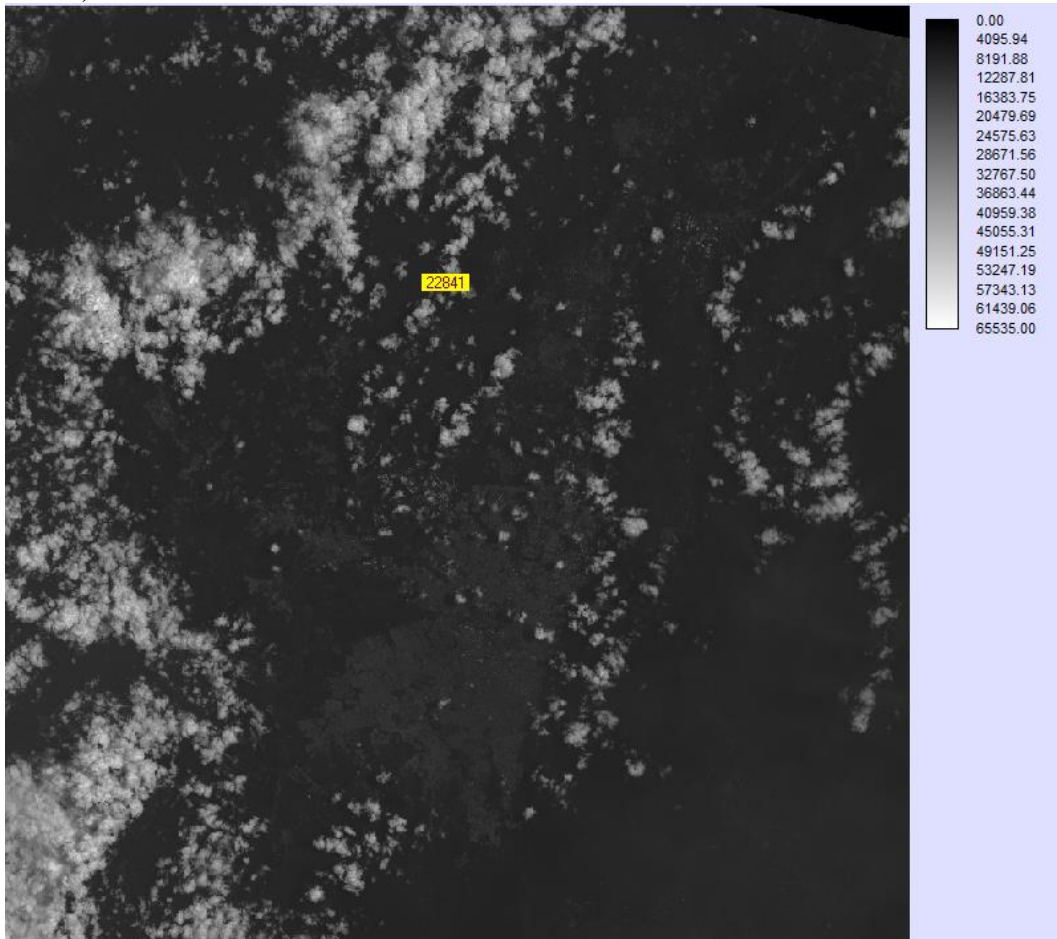


Figura 7. Ejemplo de una imagen satelital desplegada en IDRISI selva.

Para hacer un recorte en la herramienta seleccionada se ubican las coordenadas por fila y columna o si se prefiere se puede seleccionar por coordenadas en “X” y “Y” sobre la imagen satelital, se debe escoger dos puntos para realizar el recorte o establecer un polígono con las coordenadas de referencia, el primer punto será el borde superior izquierdo de la imagen y el segundo punto corresponde al borde inferior derecho, de este modo, el programa realizará un recorte con base a estos dos puntos (ver figura 8).

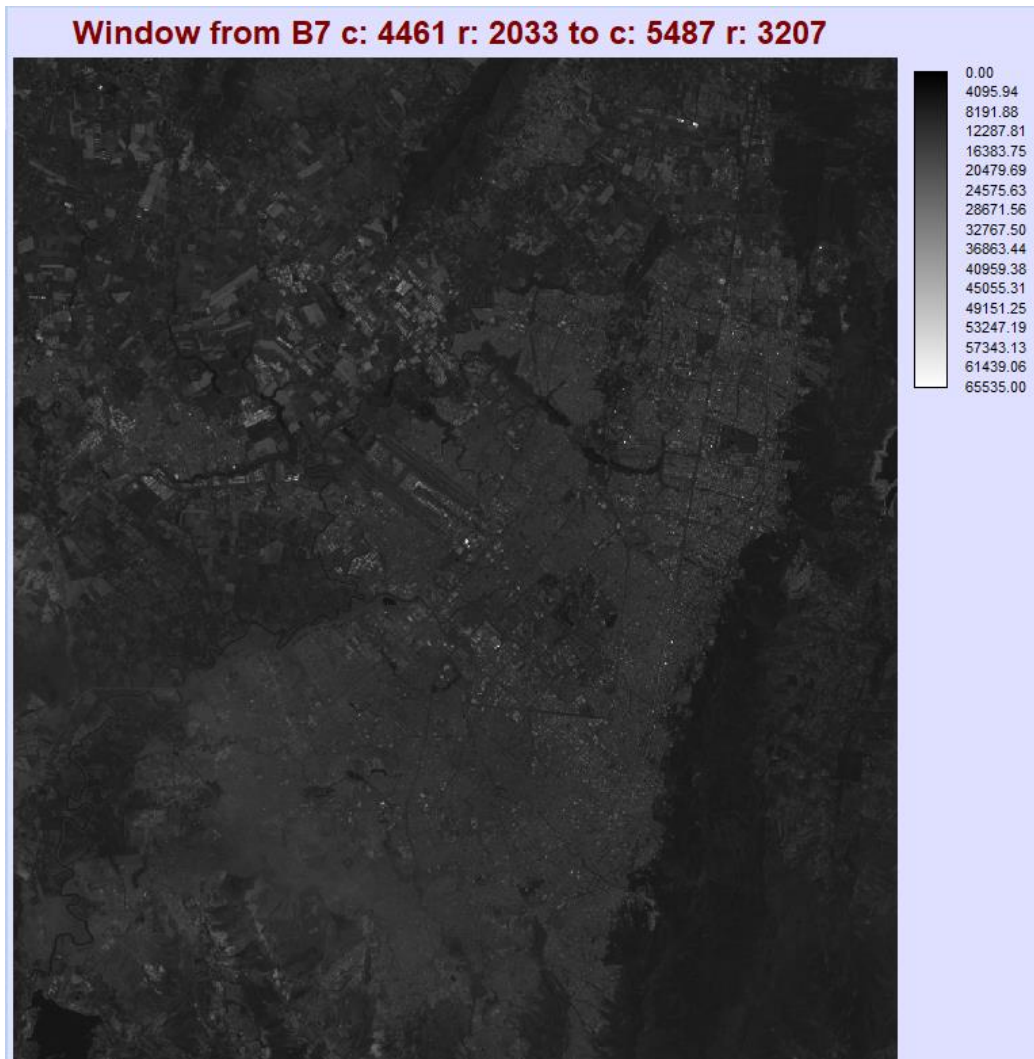


Figura 8. Ejemplo de un recorte de Bogotá de una imagen satelital desplegada en IDRISI selva.

Es necesario generar la conversión de la imagen a *GEOTIFF* a *TIFF*, como ejemplo aplicado, cargar un sector de 50 km² tomó recursos considerables para desplegar en el software la imagen completa (de aproximadamente tres minutos), por lo cual se determinó necesario delimitar un recorte con un área menor con el objetivo de conseguir una mejoría en tiempo de ejecución y de los resultados esperados (alrededor de 30 segundos en cargar el recorte). Para ilustrar el

anterior procedimiento se hace uso del software IDRISI selva, el cual cumple con las condiciones establecidas. (Ver numeral [5.2.1. Condiciones generales](#)).

Al conocer previamente la zona a trabajar con base a la salida de campo y/o la fotografía aérea, se procede a identificar las tejas de asbesto en la imagen satelital. Al tener en cuenta esta identificación inicial se debe realizar una serie de procedimientos para que el subsistema de análisis de datos pueda ser entrenado en identificar el asbesto en toda la imagen, este procedimiento se especifica detalladamente por los siguientes criterios:

5.3.4. Preprocesamiento de la subimagen

Con el objetivo de mejorar la calidad de la imagen para la clasificación es recomendable aplicar métodos de mejora de contraste, para esto, se pueden utilizar algoritmos de expansión lineal y ecualización del histograma. Es importante destacar que en el mejoramiento por ecualización del histograma los píxeles originales pertenecientes a una misma categoría no pueden dividirse en más de una categoría en la imagen resultante, se puede asignar un porcentaje para la asignación de píxeles.

Los píxeles obtienen una mejora considerable en cuanto al nivel de contraste lo cual permite destacar más detalles sobre la imagen en el momento de aplicar el clasificador supervisado, en el cual al clasificador se le facilita identificar el píxel correspondiente al asbesto, esta clasificación se explicará con más detalle en los siguientes numerales.

5.3.5. Desarrollo de la clasificación

A partir del área seleccionada se debe proceder a realizar una clasificación del asbesto sobre otros materiales comunes en las cubiertas, este procedimiento hará parte del subsistema de análisis de datos, para esto se debe clasificar y diferenciar de otros materiales para que el sistema pueda detectarlos entre sí, por eso a mejor reconocimiento de la zona y de los materiales expuestos se puede mejorar la clasificación que el sistema generará, también con el apoyo de la firma espectral se podrá entrenar al sistema para que la identificación del asbesto sea la más exacta, de este procedimiento se destaca lo siguiente:

Clasificación supervisada

Los sistemas de clasificación emplean una clasificación digital asistida por computadora guiados por la interpretación humana. Para realizar una clasificación adecuada se busca entrenar al sistema para que este pueda clasificar el asbesto de otros materiales. Al conocer inicialmente los tejados que contienen este material, se seleccionan múltiples polígonos que servirán como entrenamiento del sistema, con lo cual el sistema comparará este tipo de material en toda la imagen seleccionada, realizando una primera clasificación sobre toda la superficie delimitada.

Cómo objetivo de esta clasificación se provee una descripción estadística al definir los polígonos, de este modo se espera que este tipo de coberturas se puedan interpretar en toda la

imagen, en el sistema se usa un clasificador para evaluar que cada píxel corresponda a una de esas clases definidas en los polígonos.

A continuación, se puede destacar una serie de clasificadores los cuales pueden ser utilizados para realizar la clasificación supervisada y evaluar los resultados obtenidos.

Clasificadores Rígidos

Este tipo de clasificador consiste en que toma una decisión definitiva en el momento que evalúa una superficie terrestre, es decir, estos evalúan la superficie terrestre a la que pertenece un píxel en específico, entre ellos se destacan los clasificadores de *paralelepípedos (PIPED)*, *Distancia Mínima a la Media (MINDIST)*, *Análisis Discriminante Lineal (FISHER)*, *Probabilidad Máxima (MAXLIKE)*, estos clasificadores se ejecutan con el objetivo de generar la clasificación más detallada y selecciona los que tienen una clasificación más efectiva para el asbesto. Se destaca el clasificador *MAXLIKE* y *FISHER* debido que estos clasificadores son de los más utilizados en la clasificación de imágenes tomadas con sensores remotos. [24][25]

Clasificadores Blandos

Este tipo de clasificador a diferencia de los rígidos no toman una decisión definitiva al evaluar la superficie terrestre, estos ofrecen una probabilidad de que cada píxel pueda representar una clase, es decir, indica la probabilidad de que un píxel pertenezca a una clase, por ejemplo, de que un píxel pueda ser considerado de la clase vegetación densa, una superficie terrestre o a una zona pantanosa, entre otros. A diferencia del clasificador rígido, el blando ofrece un rango de incertidumbre por lo cual puede ser útil para cualquier tipo de propósitos. Un experto analista puede analizar esta incertidumbre e identificar cuales superficies pueden generar errores por su gran parecido al material por identificar, esto puede ser de gran ayuda para que el algoritmo tenga un poco de flexibilidad a la hora de realizar la clasificación. Se reconocen cuatro tipos de clasificadores blandos, que son el *BAYCLASS*, *BELCLASS*, *MAGALCLASS* y *FUZCLASS*, estos se diferencian entre sí por la lógica en la cual se especifica esta incertidumbre, también ofrecen una amplia variedad de herramientas para analizar esta mezcla de subpíxeles, como el *MAXSET*, *MIXCAL*, *FUZSIG* y *UNMIX*. [25]

Estos tipos de clasificadores no se usarán debido a que se necesita mayor capacidad de análisis de las diferentes superficies, así como también de análisis estadístico sobre el tipo de probabilidades en el que el clasificador puede determinar una determinada clase. El manejo de errores e incertidumbre salen del alcance del proyecto.

Clasificadores Hiperespectrales

Estos tipos de clasificadores se destacan por operar con imágenes Hiperespectrales, los mencionados anteriormente trabajan sobre imágenes multiespectrales, por lo cual este tipo de clasificador solo difiere al extender la lógica a muchas más bandas, estos difieren en el grado, volumen de datos y a la alta resolución espectral, estos proporcionan sus propios clasificadores aplicados para captar este volumen de datos, como el *Ángulo Espectral Cartográfico HYPERSAM*, *Proyección Ortogonal Subespacial HYPEROSP*, *Distancia Mínima Hiperespectral HYPERMIN*, *Eliminación de la Mezcla de las Líneas Espectrales*

HYPERUNMIX y el Análisis del Área de Absorción HYPERABSORB para clasificación supervisada. [25]

Estos tipos de clasificadores no se usarán para el proyecto, debido a que no se cuenta con imágenes hiperspectrales, en este se hace uso de imágenes multiespectrales con 8 bandas.

Al considerar los clasificadores mencionados anteriormente, se hará uso de los clasificadores rígidos porque ofrecen un criterio de selección estricto por lo cual pueden proporcionar una adecuada clasificación del asbesto si se establecen adecuadamente los polígonos de entrenamiento. A continuación, se detalla el funcionamiento de cada clasificador:

5.3.5.1. PIPED (Paralelepípedos)

Este algoritmo define una zona en forma de paralelepípedo para realizar una clasificación, es decir, un área rectangular en donde se caracteriza cada clase por el rango de valores de cada clase, este es definido por unos valores mínimos y máximos hallados en el entrenamiento definido para cada clase o por algún rango de desviaciones de la media (como la desviación estándar). La regla de clasificación es que el píxel con una identidad desconocida pueda ser asignado dentro de uno de los paralelepípedos para adjudicarlos a una clase en particular. Este algoritmo es fácil y rápido de implementar, pero puede tener dificultades por que puede generarse un solapamiento dentro de los paralelepípedos, es decir un píxel puede estar dentro de más de un área, o, por el contrario, puede darse el caso que no esté en ninguna área y el algoritmo los deje fuera sin asignar, en la figura 9 se ilustra las áreas en donde el algoritmo genera la clasificación a cada píxel al pertenecer a una clase definida en el entrenamiento.

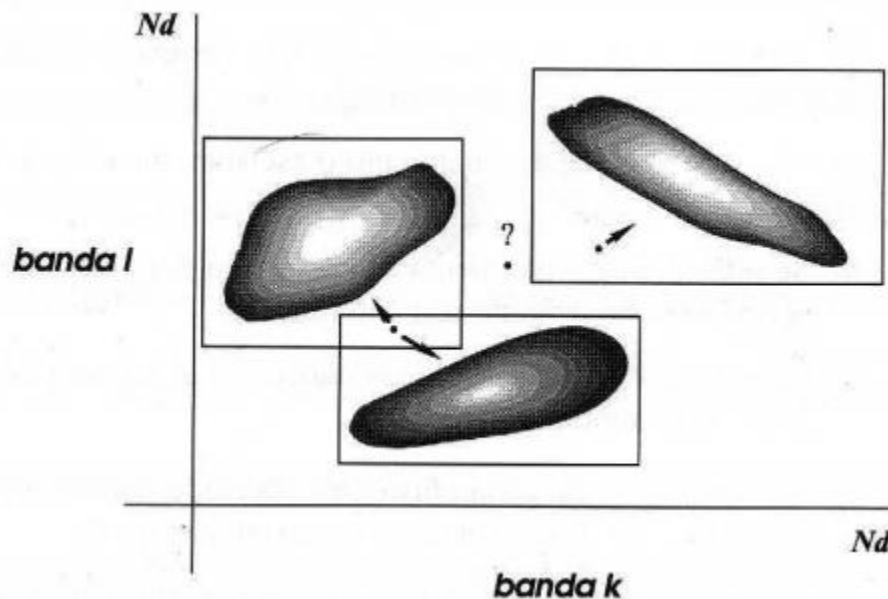


Figura 9. Clasificador de paralelepípedos. Tomado de Pinilla, 1995, pág. 238. [26]

5.3.5.2. MINDIST (Distancia mínima a la media)

Este algoritmo realiza la clasificación de píxeles por la distancia desde un píxel en específico hasta cada clase, en esta se utiliza la distancia euclidiana (ver figura 10), en donde para cada celda, la distancia a esta celda se determina al calcular la hipotenusa, con esto se determina la distancia más corta al origen. El software utilizado debe tener la capacidad de calcular la distancia de los clusters definidos a las celdas que no presentan datos, de este modo elige el más cercano (ver figura 11).

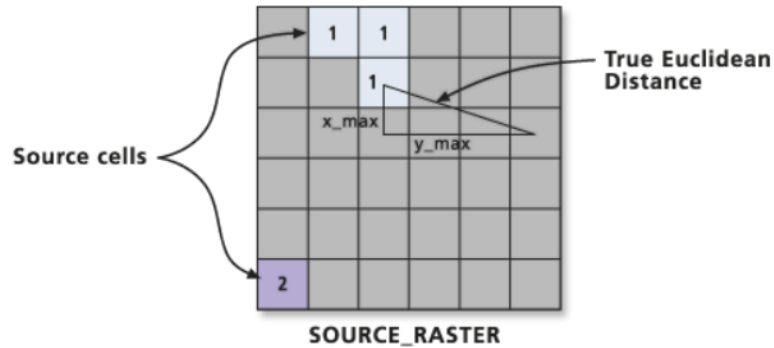


Figura 10. Clasificador Mindist. Tomado de arcGIS online.

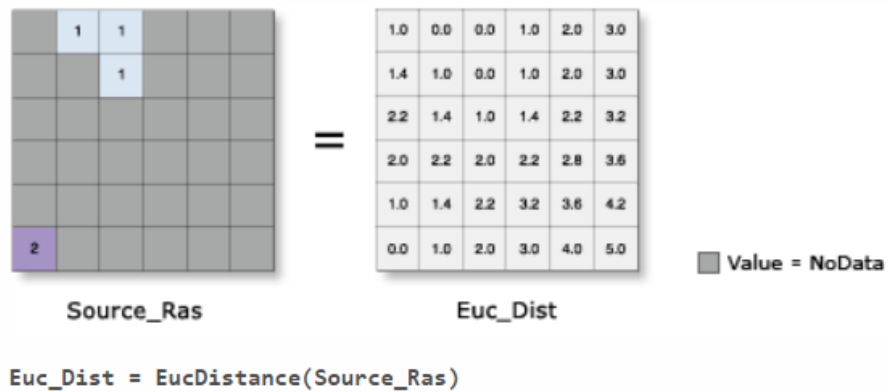


Figura 11. Clasificador Mindist. Tomado de arcGIS online. [27]

Este algoritmo es de los más simples, en este se destaca su buen desempeño con zonas de entrenamiento limitadas, aunque puede verse afectado si hay mucha variabilidad de las firmas espectrales. Este caracteriza cada clase por su reflectancia de banda media, por lo cual puede tener conflictos cuando algunas clases varían más que otras.

5.3.5.3. MAXLIKE (Probabilidad Máxima)

Este algoritmo esta para compensar las principales dificultades que tiene el algoritmo *PIPED* y *MINDIST*, en este se pone a prueba el procedimiento de máxima verosimilitud, el cual está basado en la probabilidad bayesiana, aquí los píxeles se asignan a la clase más probable al comparar la probabilidad de que cada pixel pertenezca a cada una de las firmas consideradas del grupo de entrenamiento, cabe resaltar que se emplea la media, los datos de la varianza y covarianza de las firmas espectrales (ver figura 12).

Este algoritmo permite definir la probabilidad a priori. Aquí el experto puede definir la probabilidad de que pertenezca a una clase, es decir, si el experto determina que en una mayor superficie se encuentra un material en específico, puede asignar un valor que estime una probabilidad de que pertenezca a esa clase, por ejemplo, si hay una carretera el experto podría afirmar que hay una gran probabilidad de que se clasifique una zona urbana cerca de la carretera, como también que sea poco probable cuando se está muy alejado a la carretera identificar una zona urbana.

Este método ofrece buenos resultados si los campos de entrenamiento están bien definidos, pero si no es así puede resultar poco adecuado y en este caso sería una mejor alternativa utilizar el método de clasificador de mínima distancia (*MINDIST*), el cual puede ofrecer mejores resultados bajo estas condiciones.

Este método considera un número máximo de 7 bandas y hasta 200 firmas, también la muestra de píxeles debe ser al menos igual a diez veces de la cantidad de bandas.

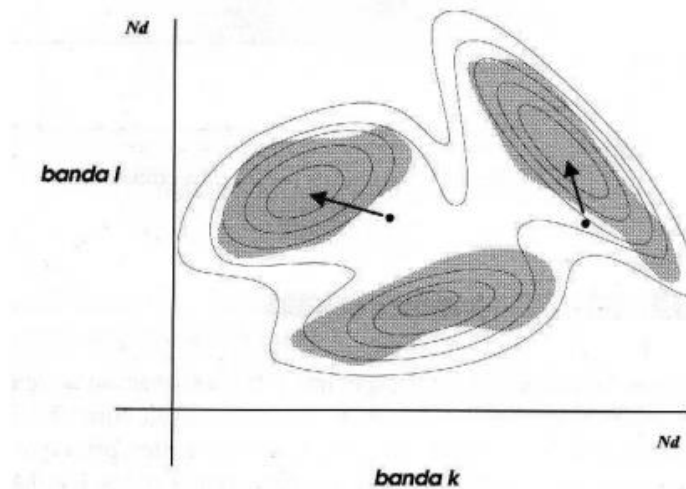


Figura 12. Clasificador de máxima verosimilitud. Tomado de Pinilla, 1995, pág. 242. [26]

5.3.5.4. FISHER (Análisis discriminante lineal)

Este clasificador es uno de los más robustos y más complejos, en este se conduce a un análisis discriminante lineal de los datos de entrenamiento para formar un grupo de funciones lineales el cual determinen el grado de acierto a una clase en específica, es decir, la clase asignada a cada píxel representa la que obtuvo la mayor aproximación dada la evaluación de todas las funciones lineales. Este clasificador está determinando por una regresión lineal multivariada, en donde se define como variable independiente las bandas de la imagen y como variable dependiente la medida del apoyo, estas ecuaciones se calculan de una manera en la que maximizan la varianza entre clases y minimizan la varianza dentro de las clases. [25]

Este algoritmo contempla una considerable carga en procesamiento de los datos, si los sitios de entrenamiento son de alta calidad, puede proporcionar resultados precisos.

5.3.5.5. Árboles Aleatorios (Random Trees)

Este clasificador proporciona una clasificación supervisada con una técnica robusta para realizar la clasificación, este algoritmo puede ofrecer buenos resultados al exceso de ajuste que se puede dar en imágenes fragmentadas o con datos antiguos. En este se realiza la clasificación de árboles por píxel según la entrada en los datos, es decir, ofrece una recopilación de árboles de decisión individuales en donde se generan de distintas muestras, cada árbol de decisión permitiendo clasificar cada píxel en el cual se crea un número de decisiones y se ordena por la importancia. Al representar los árboles de manera gráfica para un píxel, estos tienen el aspecto de una rama, al generar toda la clasificación estas ramas forman un árbol. El algoritmo parte de una selección del usuario aleatoria de los píxeles, lo cual proporciona una amplia variedad de árboles de decisión, el algoritmo finalmente elige la salida del árbol más frecuente como clasificación general. [29]

5.3.5.6. SVM (Máquina de Vectores de Soporte)

Este clasificador proporciona una clasificación supervisada de alto desempeño, en esta se parte de un conjunto de entrenamiento o muestras sobre la clase a identificar, con base a estas clases el algoritmo empieza a construir un modelo que permite predecir la clase establecida en una muestra más amplia, específicamente al mencionar el procesamiento de imágenes, se acepta una gran variedad de bandas y se realiza una clasificación por píxel. Una de las ventajas de este algoritmo es que ofrece manejar imágenes segmentadas, es decir, imágenes que pueden estar compuestas por una gran cantidad de atributos, esto puede proporcionar una adecuada clasificación si se cuenta con una imagen satelital de alta resolución, también es menos susceptible al posible ruido que se puede generar entre las bandas correlacionadas o por el tamaño de los sitios de entrenamiento definidos para cada clase. [28]

Clasificación no supervisada

Es importante mencionar que existen otro tipo de clasificadores, la clasificación no supervisada desconoce las clases al comienzo, en este tipo de clasificación el sistema busca descubrir en la imagen patrones de ocurrencia en común y de reflectancia. En general, el sistema automáticamente realizará su propia clasificación de materiales sobre la imagen ingresada y el experto entrará a detallar los resultados obtenidos. Para este proyecto de grado no se realizará este tipo de clasificación, debido a que el énfasis del proyecto se enfoca en la identificación del asbesto, esta clasificación generará una identificación de distintas superficies, que puede ser la vegetación, las zonas urbanas, ríos, entre otros, que no son de interés para el proyecto.

Este tipo de clasificación es importante mencionarla debido a que es una opción que se puede usar para identificar automáticamente distintos tipos de materiales, pero al evaluar los objetivos específicos y el propósito de este trabajo, los cuales consisten en identificar y clasificar correctamente el asbesto, no se realizará debido a que se desconoce los otros tipos de materiales.

El entrenamiento definido se efectuará analizando la firma espectral del asbesto, a la combinación de bandas multiespectrales y conociendo previamente su comportamiento, lo cual es un procedimiento más detallado en el que no se puede ejercer control en una clasificación no supervisada, en general este tipo de clasificaciones no supervisadas no ofrecen las condiciones requeridas para realizar una clasificación adecuada del asbesto.

5.3.6. Validación

Al obtener los resultados generados de cada tipo de clasificación se debe comparar los datos de cada algoritmo de clasificación supervisada y los datos de control, estos datos de control son determinados a partir de la salida de campo, en donde se ha realizado previamente una identificación del asbesto. Este tipo de control inicial se puede establecer con el apoyo de la fotografía aérea y el conocimiento previo de la zona a identificar (ver [Anexo IV-Fotografía aérea](#)), esto como principal factor para luego hacer la comparación de las clasificaciones generadas por cada algoritmo con el objetivo de encontrar errores y determinar en cuanto varía cada clasificación supervisada.

Con base a los resultados, si se presenta un margen de error muy amplio al generar la clasificación supervisada, se recomienda generar un nuevo entrenamiento para la clasificación con el propósito de mejorar la exactitud del procesamiento. Este procedimiento se puede hacer múltiples veces hasta tener la certeza de que la clasificación tenga una precisión adecuada (es recomendable que la identificación sea mayor a un 75% de exactitud).

Como resultado el sistema generará una caracterización estadística de cada clase de información, en la cual, la imagen es clasificada a partir de los valores de cada píxel, de este modo el sistema debe proporcionar la información asociada de cada píxel entorno a la clasificación, es decir, generará los datos procedentes de la clasificación supervisada.

En general el sistema toma en cada clasificación una decisión de acuerdo a las zonas de entrenamiento en las cuales está implícito el uso de las firmas espectrales, de esta manera cada

algoritmo de clasificación se efectúa por los píxeles seleccionados como entrenamiento. El software elegido para cada clasificación propuesta debe proporcionar una variedad de opciones y herramientas para lograr realizar las clasificaciones sugeridas, de lo cual se destaca el uso de clasificadores rígidos, el *SVM* y *Random Trees*. Estos clasificadores son los que realizarán la identificación del asbesto, con base a una regla establecida para tomar estas decisiones al efectuar la clasificación del material. El subsistema de análisis de datos será el responsable de procesar la información y evaluar los resultados de la clasificación del asbesto.

Con base a estos resultados, se procede a elegir la clasificación más acertada que brinde la mejor clasificación del asbesto, es importante validar que desde la creación de las firmas espectrales se presente un comportamiento similar al documentado anteriormente en el estado del arte, ver [Figura 1](#), con base a esto se elige la mejor clasificación para publicar en un sistema de información geográfica.

5.3.7. Integración con un SIG (Sistema de información Geográfico)

Este procedimiento inicia con los resultados del subsistema de análisis de datos en donde se genera una clasificación óptima del asbesto, en esta representación se pretende consolidar y publicar la información en el sistema de información geográfico, en un entorno en el cual pueda ser accedida por cualquier usuario y en lo posible desde cualquier lugar a través de cualquier navegador web, o en una aplicación desde Smartphone o Tablet.

En general se establece como indispensable que la información pueda ser compartida por una comunidad de usuarios en donde se pueda establecer la colaboración y el uso de la información publicada, esto al enfocarse como un objetivo a futuro en que esta información pueda ser vital para la planificación, toma de decisiones, anticipar y administrar cambios, comunicar de forma más efectiva, entre otros. Con la información consolidada se puede profundizar con otros datos publicados, el apoyarse en los datos disponibles puede crear a futuro nuevos mapas de información geográfica o complementar otros.

6. RESULTADOS

A continuación se mencionan los resultados obtenidos, con base en el procedimiento metodológico propuesto para la identificación del asbesto:

6.1 Selección del área a trabajar

A partir del área seleccionada en el sector de Compostela en Usme, se determinó un polígono resultante de 25 km² de una imagen satelital WorldView03 de 8 bandas (ver figura 13 y figura 14), con resolución espacial de 1.8m para las 8 bandas (*Costal, Blue, Green, Yellow, Red, RedEdge, NIR1, NIR2*) y una resolución espacial de 30 cm para la banda del pancromático sobre la zona. Es importante resaltar que en el momento de hacer la selección de la imagen fue de un área sin nubosidad. A continuación se hace referencia al área seleccionada:

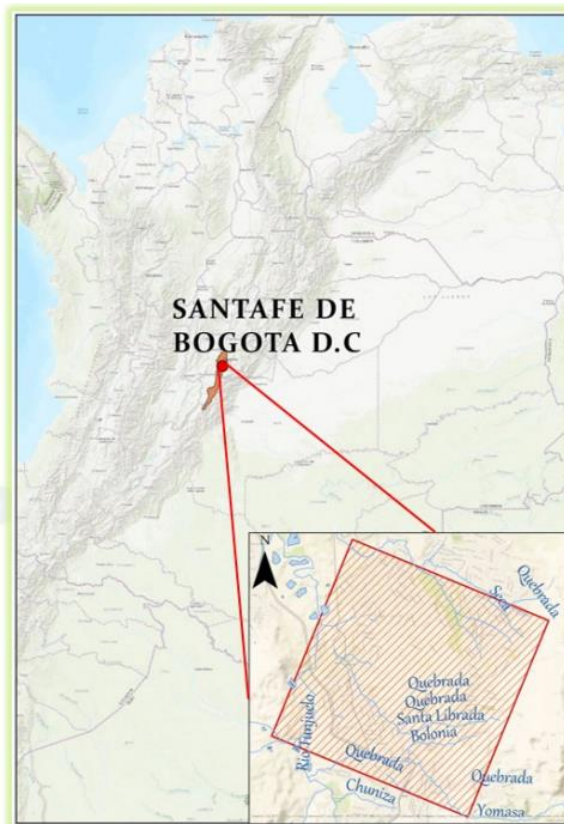


Figura 13. Polígono delimitado para la adquisición de la imagen satelital.

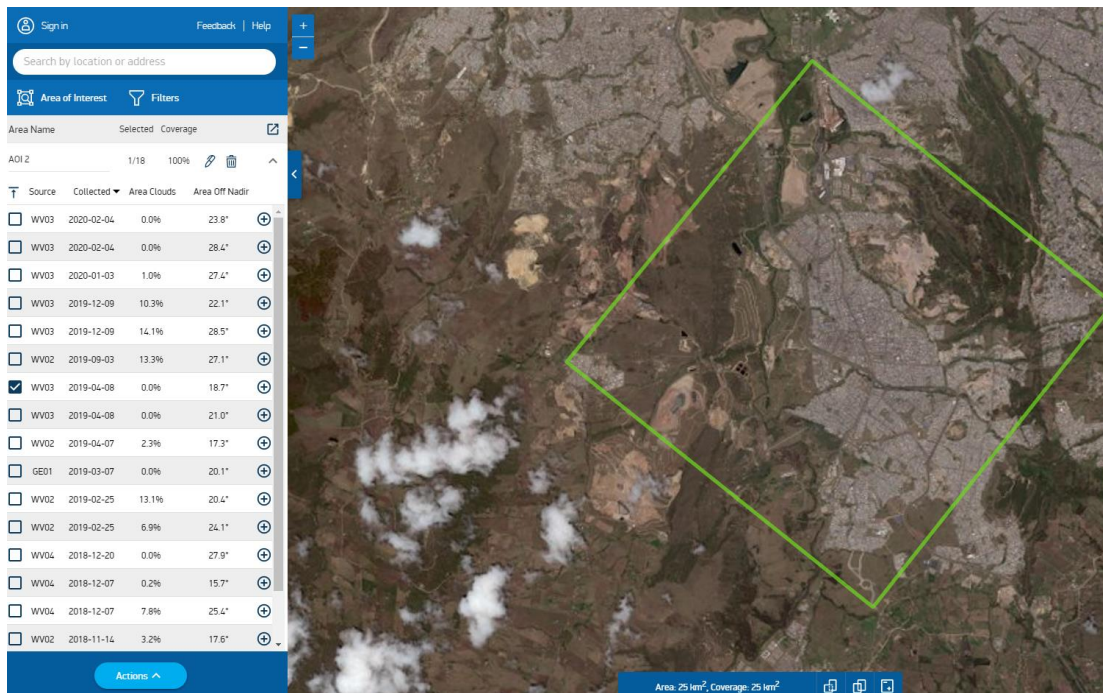


Figura 14. Polígono de 25 km².

Se determinó un área que cubriera la superficie identificada en la salida de campo y que abarcara un amplio sector, esto con el objetivo de realizar múltiples clasificaciones sobre un amplio sector en modo de prueba del sistema.

6.2 Identificación del sector en la imagen satelital

El sector seleccionado para la clasificación se localizó alrededor del barrio *Compostela*, ubicado en la localidad de Usme en Bogotá, se delimitó un polígono que sirvió como guía para su identificación en la imagen satelital, en la figura 15 se muestra cómo se identificaron inicialmente las coordenadas en la herramienta *Google Earth*.

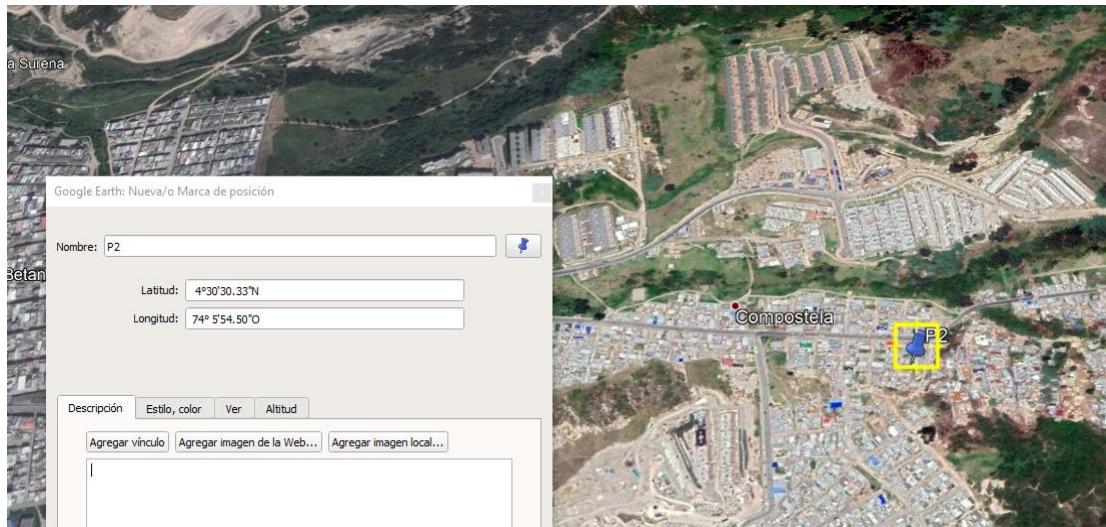


Figura 15. Ubicación del barrio Compostela, Usme

En la salida de campo se empezó a recorrer el sector identificado previamente y con base a este se establecieron unos recorridos programados para la captura de fotografía aérea.



Figura 16. Fotografía aérea sobre Compostela, Usme.

Para efectos de validar el procedimiento metodológico propuesto se realizó una toma de fotografías aéreas sobre el sector el área seleccionada. Las fotografías aéreas permitieron identificar los diferentes tipos de cubierta existentes en las edificaciones ubicadas en el área de trabajo. En la figura 16 se puede apreciar el consolidado de las fotografías aéreas sobre el sector.

Fue necesario consolidar un ortomosaico a partir de 154 fotografías aéreas utilizando un programa de procesamiento fotogramétrico de imágenes digitales, el cual ofrece facilidades para generar modelos de representación espacial en 3D. En la figura 17 se puede observar el ortomosaico generado en la herramienta *Agisoft*.



Figura 17. Ortomosaico sobre el barrio Compostela, Usme.

En términos generales se puede destacar que se hizo uso de la herramienta *Google Earth*, para la identificación de las coordenadas del barrio Compostela, Usme y el uso de la herramienta *Agisoft*, para consolidar las fotografías aéreas verticales de los recorridos programados en un ortomosaico, este proceso se puede detallar mejor en el [Anexo IV – Fotografía aérea](#).

6.3. Generación de la subimagen a trabajar

Al agrupar las imágenes de la imagen satelital adquirida (en la figura 18 se aprecia un área de 25 km² del polígono solicitado). Esta imagen es del satélite World View 03 de alta resolución, con una resolución multiespectral de 1.8m y una resolución de infrarrojo de onda corta de 3.7m. De este conjunto de imágenes se identificó el sector alrededor del barrio Compostela en Usme y con este se procedió a generar una subimagen con el recorte del área de interés.

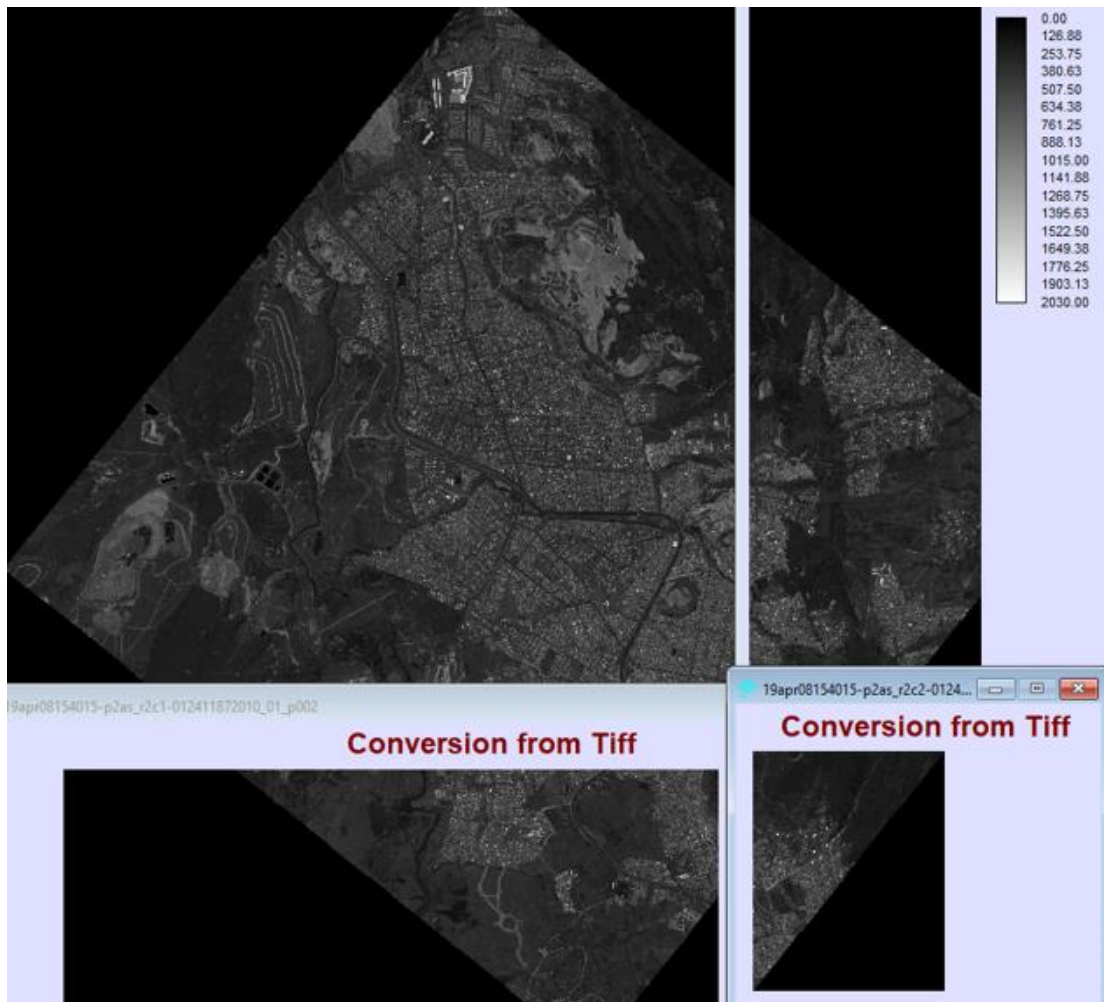


Figura 18. Imágenes multiespectrales adquiridas.

Para el procesamiento de un sector en específico y considerando los recursos computacionales, se limitó el tamaño de la imagen (ver figura 19, en la cual se muestra la generación de la subimagen).

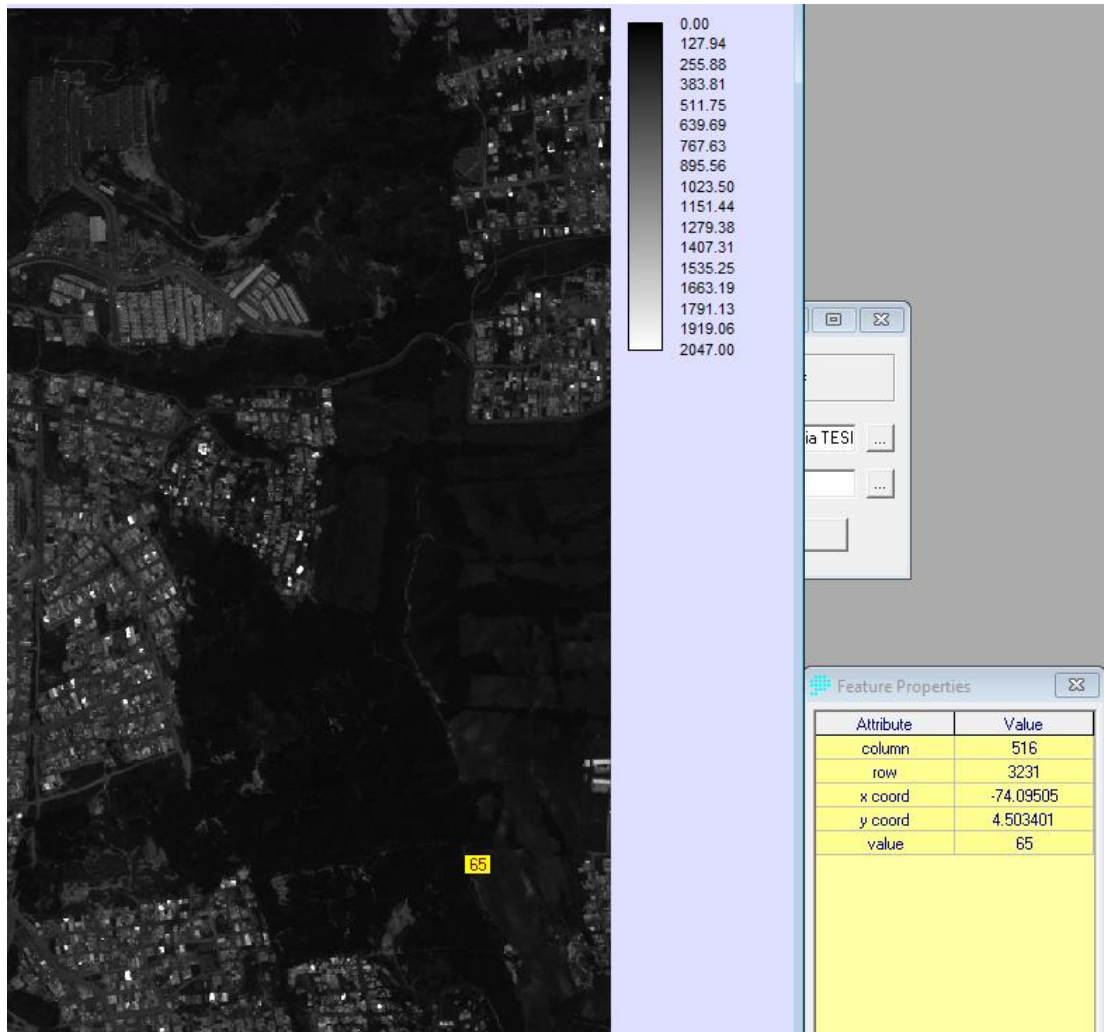


Figura 19. Subimagen generada a partir del recorte de la imagen satelital.

Se delimitó la esquina superior izquierda de la pantalla y la esquina inferior derecha para hacer el recorte correspondiente. Sobre este sector es en donde se realizó la primera identificación del asbesto con referencia a la salida de campo.

En general se puede concluir en este procedimiento que a partir de la imagen satelital inicial se realizó un recorte sobre un área delimitada definida, este recorte con el propósito de generar una imagen resultante con un área delimitada por un rectángulo de 1166 m por 617 m, de la imagen generada se procede a realizar el procesamiento.

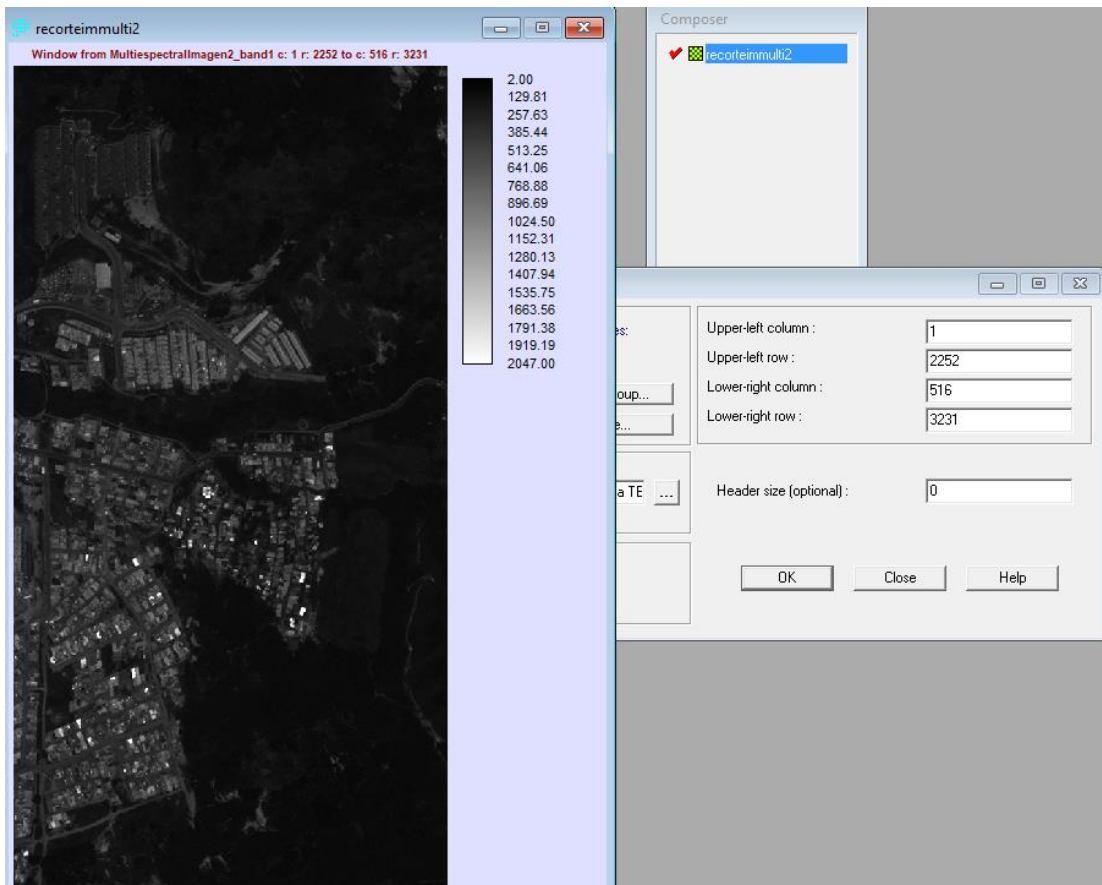


Figura 20. Recorte generado para cada banda de la imagen satelital.

El recorte se generó para cada una de las bandas adquiridas con una resolución aproximada de 221.274 píxeles, considerando la resolución de 1,8m establecidas en la entrega de la imagen satelital, en la figura 20 se muestran los parámetros para cada recorte. En total se trabajaron con 8 bandas multiespectrales.

El software elegido para este procedimiento fue IDRISI selva el cual cumple con los criterios establecidos inicialmente para la carga de la imagen satelital y la generación de la subimagen a partir de unas coordenadas establecidas.

6.4. Preprocesamiento de la subimagen

Con el objetivo de mejorar la calidad de los recortes de la subimagen, se realizó un mejoramiento de contraste de las subimágenes, en este procedimiento se aplicaron los métodos de expansión lineal y ecualización del histograma. A continuación se muestran los resultados obtenidos de cada algoritmo.

6.4.1. Linear

Se estableció un valor mínimo de 0 y máximo de 255 Bytes para cada banda, los cuales son el mínimo y el máximo permitido.

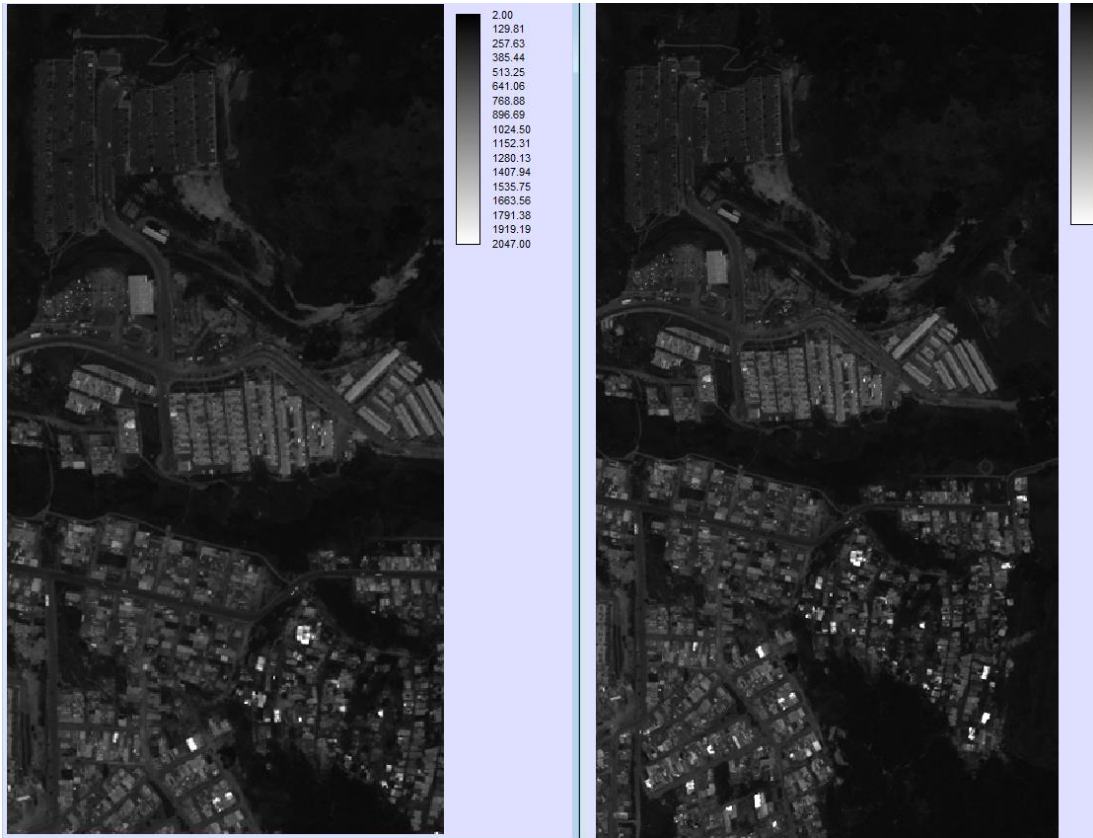


Figura 21. Mejora de contraste por el método Linear.

Esto permitió tener una breve mejoría en cuanto al contraste de la imagen. En la figura 21 podemos analizar que la nueva especificación de intervalos permitió una ligera mejora en comparación de la imagen inicial.

6.4.2. Histogram Equalization

En este se asignó el mismo número de píxeles a cada intervalo resultante, se puede observar un cambio considerable en el contraste de la imagen en cada una de las 8 bandas.



Figura 22. Mejora de contraste por el método Histogram Equalization.

En la figura 22 se puede analizar un realce en el brillo de la imagen, la intensidad de la iluminación y el contraste generado entre la gama de colores blancos y negros es mayor.

6.4.3. Linear with saturation

En este se definió un porcentaje de los pixeles de cada extremo del histograma, a los que se asignó el valor de 1%. Este valor fue modificado con el propósito de observar el comportamiento en el contraste de la imagen, este finalmente fue el que determino una imagen resultante con un detalle más específico como se puede observar en la figura 23.



Figura 23. Mejora de contraste por el método Linear with Saturation.

6.4.4. Comparación de los resultados

Al comparar los resultados anteriores, se observó que el método *Linear with saturation* presentó mejores resultados en cuanto al contraste de la imagen.

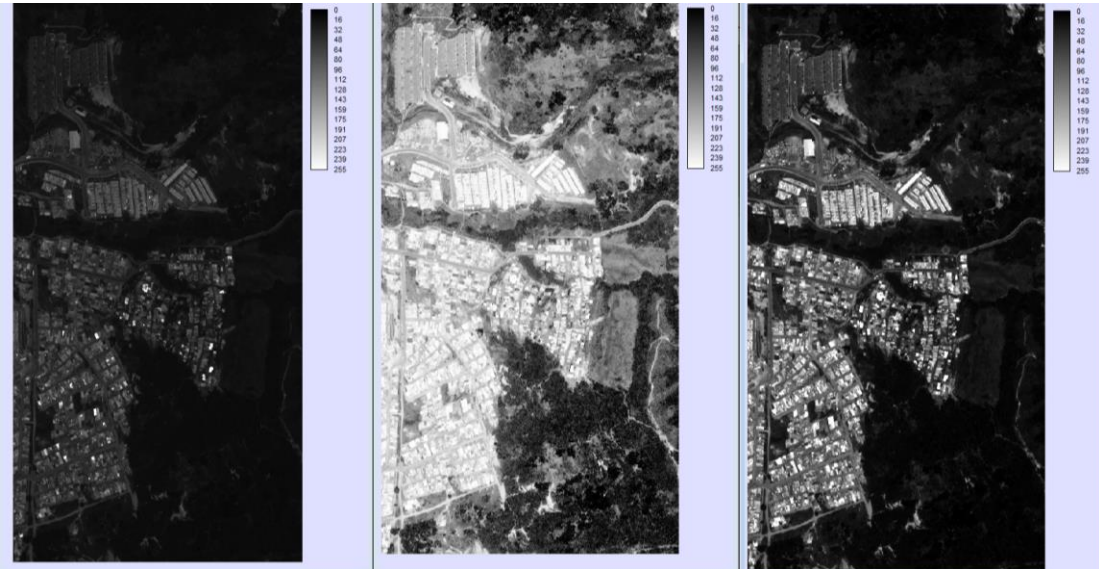


Figura 24. Comparación de los resultados obtenidos.

Si se comparan los resultados directamente, en la figura 24 se puede observar una mejora considerable en cuanto al contraste, esta mejora fue efectiva para que el clasificador pueda diferenciar mejor entre píxeles similares.

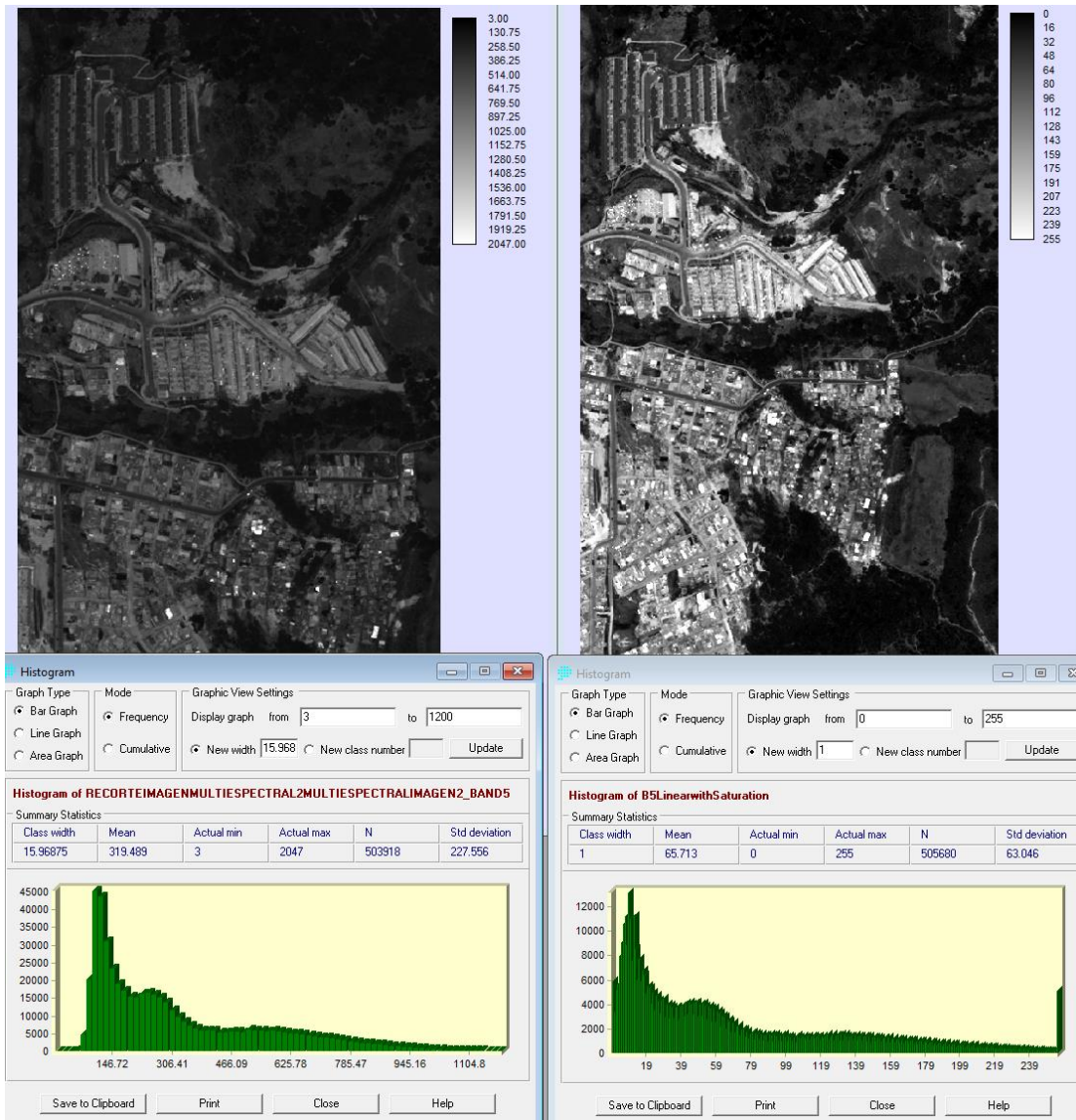


Figura 25. Comparación de los histogramas.

Al evaluar los histogramas de la imagen inicial con respecto a la imagen generada con la mejora de contraste se puede evaluar en la figura 25 que se conserva el mismo comportamiento en cuanto a la reflectancia sobre la banda, los picos del histograma representan los grupos con los valores más frecuentes asociados con los diferentes tipos de cobertura, en este caso, representa la frecuencia de pixeles asociados, se puede observar un comportamiento de una distribución normal y los datos que más se repiten se puede establecer en un rango en el cual se encuentra la mayoría de los valores.

6.5 Desarrollo de la clasificación

6.5.1 Clasificación Supervisada

Una vez mejorado el contraste de la imagen se procedió a aplicar los algoritmos de clasificación supervisada, para ello, se empezó delimitando unos sitios de entrenamiento delimitados por polígonos, los cuales fueron fundamentales para la extracción de firmas espectrales. Para este procedimiento se definieron múltiples zonas de entrenamiento y se generaron las clasificaciones para cada una. A continuación, se muestra los resultados obtenidos de una de las mejores clasificaciones que generó los mejores resultados:

Polígonos delimitados

En la figura 26 se puede observar las muestras de pixeles que exactamente cumplían con las características de los materiales, estos polígonos concentraban unos de los pixeles más característicos haciendo principal énfasis en las clases para el entrenamiento del asbesto, esto con el objetivo de evitar incluir cualquier pixel que pertenezca a otro tipo de coberturas.

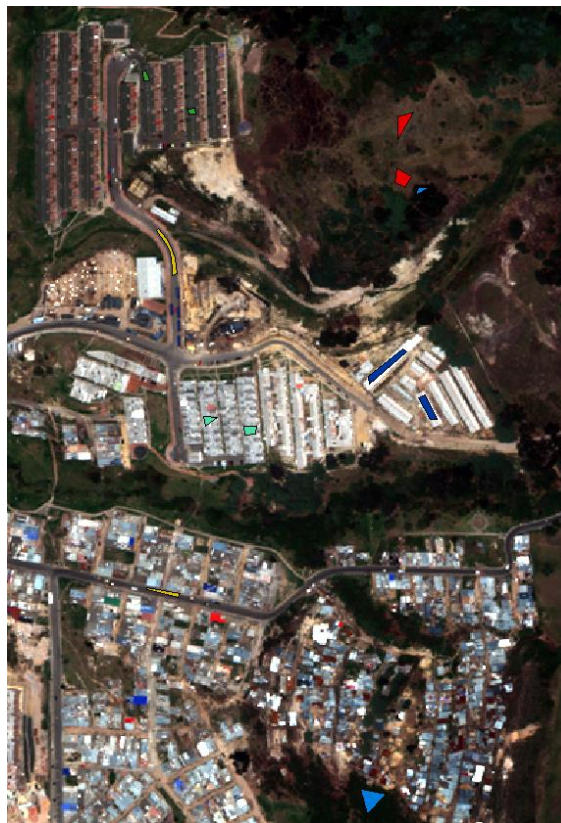


Figura 26. Sitios de entrenamiento

En general se consolidó una imagen de color natural con las bandas 5, 3 y 2, que corresponden a la banda rojo, verde y azul, de esta se establecieron varios sitios de entrenamiento de los cuales se identificaron 6 clases, estas clases son de los materiales más relevantes de las superficies que se pudieron identificar en la salida de campo, estas corresponden al asbesto, al bosque de una vegetación densa, a la carretera o calles, a zonas de baja vegetación como el pasto, a los techos de plástico y finalmente los techos de cerámica.

Estas áreas de entrenamiento son libres de anomalías y contemplan una cantidad suficiente de píxeles para realizar la clasificación.

A continuación, en la figura 27 se resaltan las firmas espectrales generadas con los polígonos de entrenamiento para cada clase, se puede ver el nivel de reflectancia de cada material y como difiere de los otros.

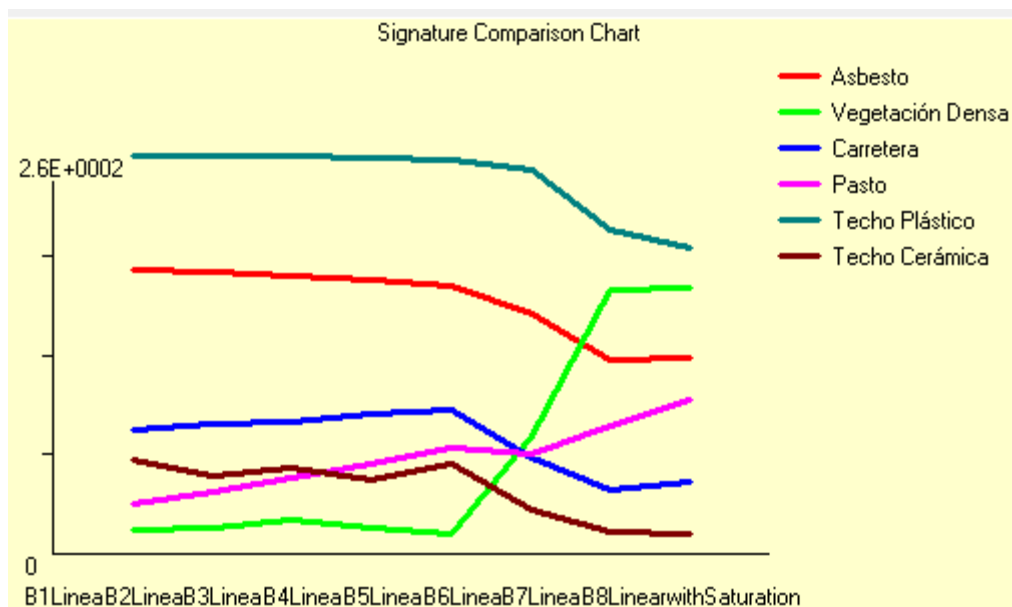


Figura 27. Firmas espectrales de las clases

Se puede resaltar que de las bandas multiespectrales adquiridas se realizó una clasificación aproximada de 450nm a 1045nm, al comparar la Figura 27 con la [Figura 1](#) podemos ver que presentan un comportamiento similar, ofreciendo una breve validación de que los resultados obtenidos corresponden con los datos analizados en el estado del arte.

El procedimiento anterior se realizó en el software *IDRISI Selva*, el cual cumplía con las condiciones establecidas, se resalta el uso de este por qué permitió generar los polígonos y analizar las firmas espectrales de cada clase.

6.5.2. Algoritmos de clasificación

El software en donde se realizó la clasificación es *IDRISI selva*, el cual contempla varias técnicas llamadas clasificadores para la toma de decisiones, estas se dividen en tres grupos que ofrecen un procesamiento de imágenes basadas en reglas de decisión de variable, en esto se aplicaron los clasificadores rígidos. Para la aplicación de los algoritmos *SVM* y *Random Trees*, se usó el software *arcGIS pro*, el cual permitió cargar las zonas de entrenamiento establecidas en *IDRISI selva*, de tal modo que los resultados generados corresponden a los mismos polígonos usados para los clasificadores rígidos.

Al utilizar el software para delimitar unos polígonos de entrenamiento se generó una clasificación de los materiales sobre la subimagen, a continuación, se mencionan los resultados obtenidos al aplicar los métodos de clasificación supervisada propuestos en el procedimiento metodológico:

6.5.2.1. PIPED (Paralelepípedos)

En este primer clasificador, se debieron asignar las firmas espectrales generadas. En la figura 28 se puede observar los resultados del algoritmo *PIPED*, el cual permitió identificar cada clase según el rango de valores de cada banda.

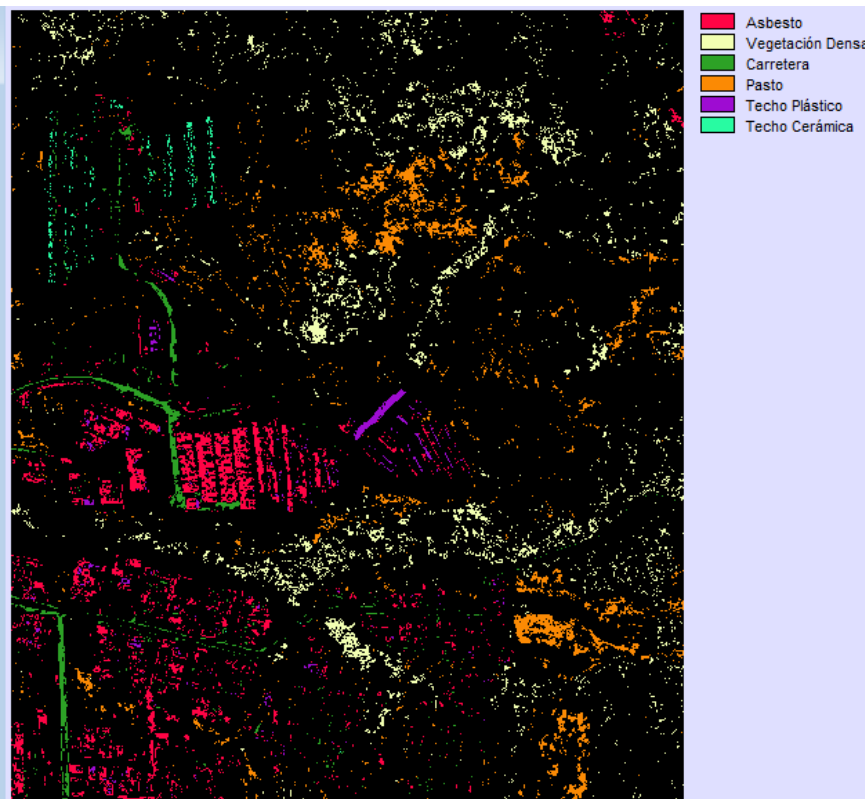


Figura 28. Clasificación supervisada PIPED.

Se analizó que este tipo de clasificador resalta sólo los elementos que concuerdan con la firma espectral dada. Este resultado se debe a los pocos pixeles de entrenamiento que tuvo el algoritmo para generar la clasificación. Las zonas negras representan áreas en donde el algoritmo no pudo identificar los pixeles y por lo cual no se asignaron a ninguna clase.

Se puede resaltar que gran parte de la superficie no fue asignada, esta clasificación concuerda con el entrenamiento debido a que no se especificó una gran cantidad de diferentes tipos de superficies con materiales distintos de la imagen, por lo cual no fueron asignados a las clases especificadas inicialmente, también se contempla que gran parte del área identificada en la salida de campo fue clasificada correctamente con el color rojo en la parte superior izquierda de la figura 29.

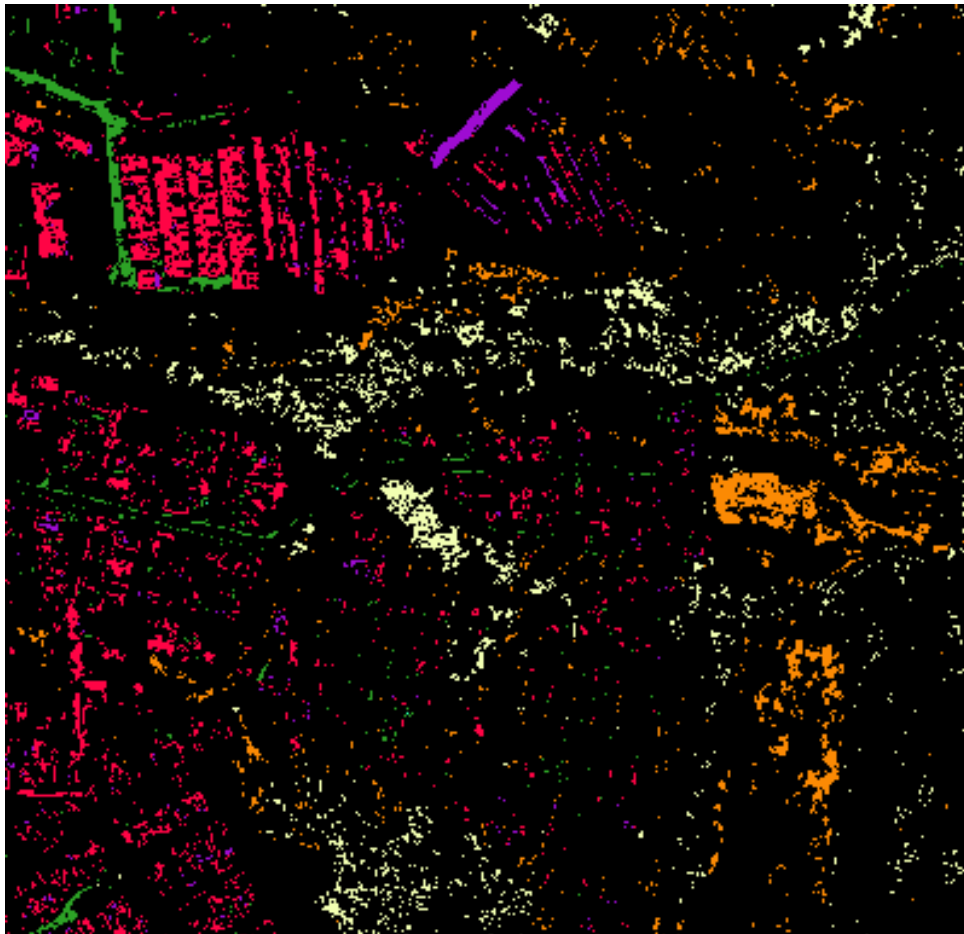


Figura 29. Detalles de la Clasificación supervisada PIPED.

También se puede resaltar en la parte superior derecha de la figura 29, que el algoritmo tuvo algunas dificultades en diferenciar algunos de los techos de plástico.

6.5.2.2. MINDIST (Distancia mínima a la media)

Este algoritmo funciona como un clasificador de la distancia mínima a la media. En este se requirió menos tiempo en el cálculo de la clasificación, esto debido a que es un algoritmo sencillo el cual determina la distancia entre cada pixel y la media de cada clase, es decir, se define un clúster correspondiente a cada material, en el cual el algoritmo asigna el pixel más cercano a cada clase.

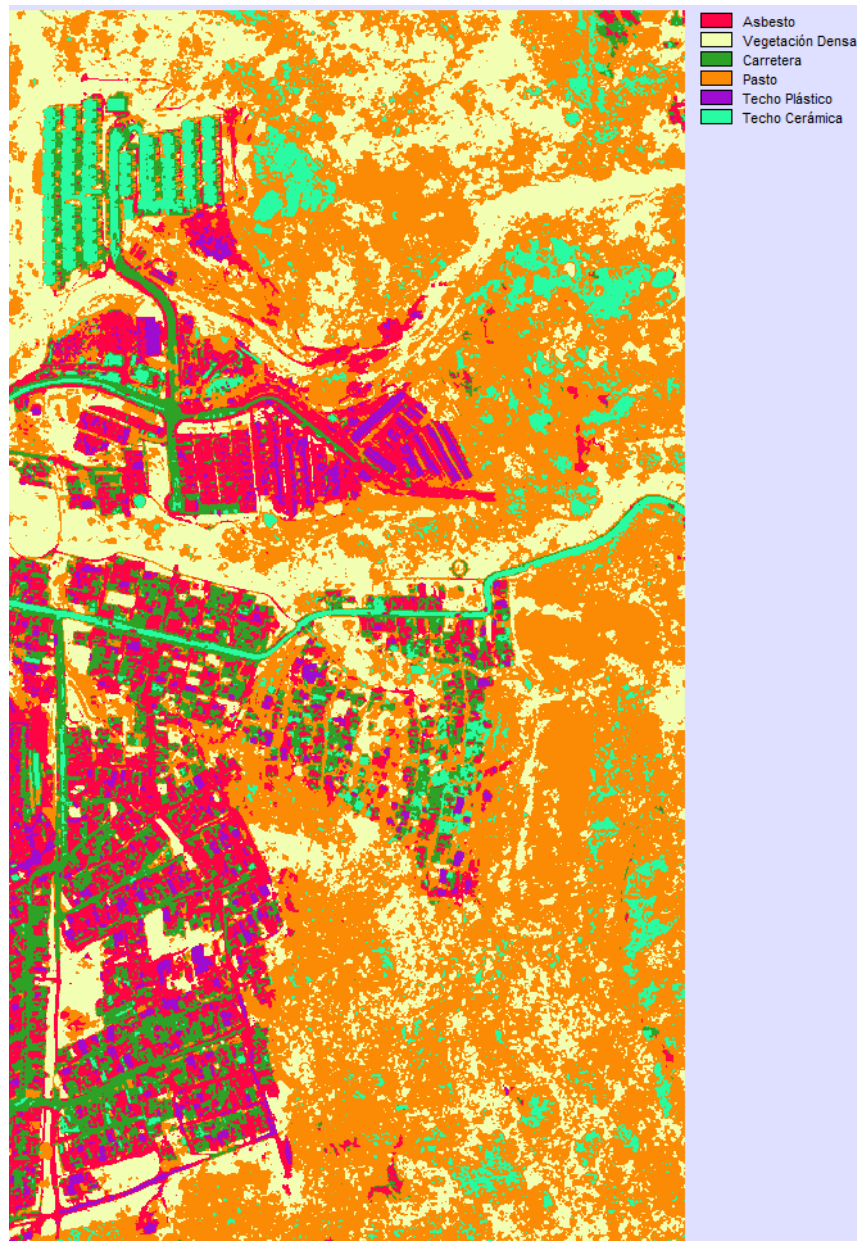


Figura 30. Clasificación supervisada MINDIST.

De la figura 30 se puede analizar una adecuada clasificación en mayor medida de las clases definidas para la vegetación, esto puede deberse a los valores del brillo y de la característica espectral de estas superficies, sin embargo, el propósito de identificar el asbesto de la zona urbana tiene algunas dificultades, por lo cual se puede observar que presenta problemas en diferenciar los diferentes materiales de la zona urbana.

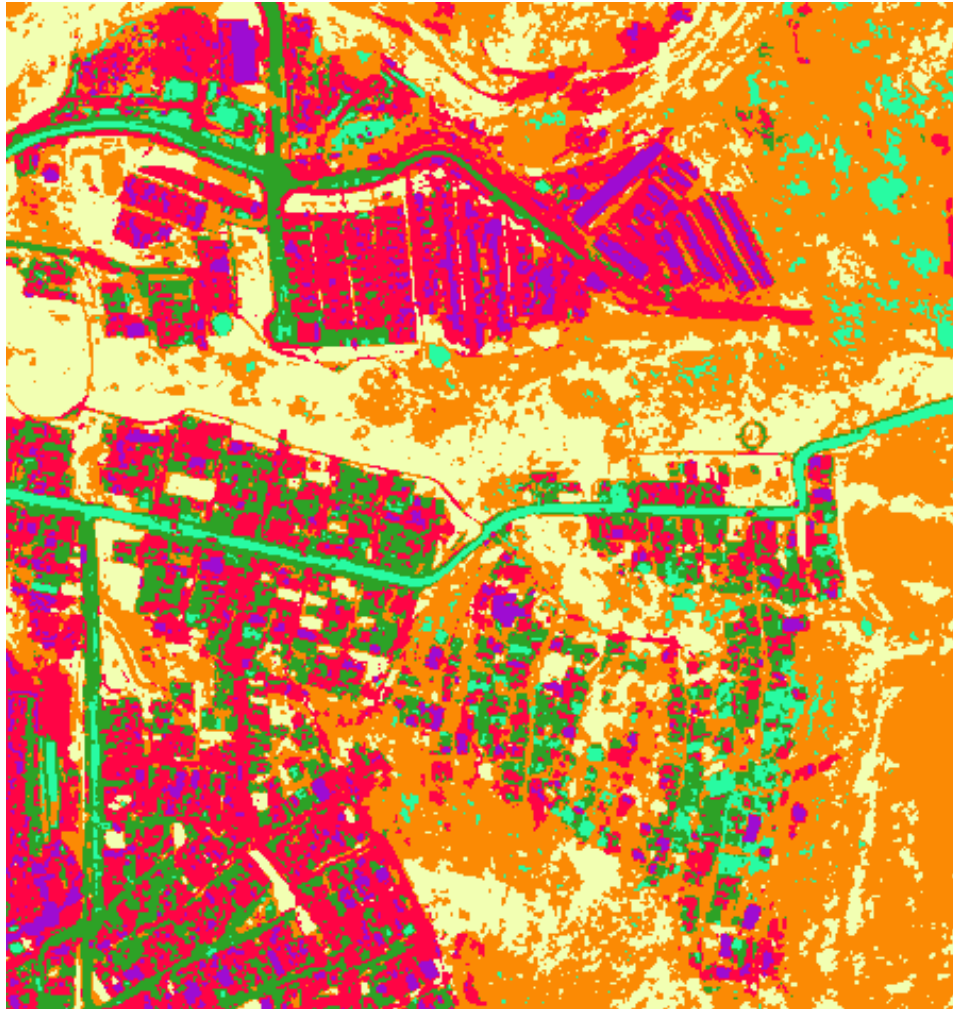


Figura 31. Detalles de la Clasificación supervisada MINDIST.

Entrando a un mayor detalle, en la figura 31 se puede detallar en algunas superficies que el algoritmo suele confundir parte de la carretera con el techo de asbesto y gran parte del techo de cerámica con la carretera, esto se puede deber a que la reflectancia entre las bandas pueden ser similares para este clasificador, por lo cual este asigna gran parte de la clasificación como asbesto y techo de cerámica.

6.5.2.3. MAXLIKE (Probabilidad Máxima)

Como un algoritmo de clasificador de probabilidad máxima en este caso en particular se estableció por defecto el valor de la probabilidad 0.166 debido a la cantidad de bandas proporciona el valor estadístico.



Figura 32. Clasificación supervisada MAXLIKE.

En la figura 32 se identificó que el algoritmo confunde gran parte de las clases de la zona urbana, en este caso en particular, el algoritmo no diferencia el asbesto de las vías en gran parte de la subimagen generada. Esto puede deberse a que la probabilidad de que pertenezca a una clase es muy similar entre el asbesto, la carretera y los demás materiales de la zona urbana.

Al no contar con un entrenamiento con una muestra bastante detallada para cada superficie de la zona urbana, como se puede detallar la clasificación en la figura 33 el algoritmo asume que la mayor parte de la zona pertenece a la clase asbesto, y también por tener similitudes en cuanto a la media de estas firmas espectrales.

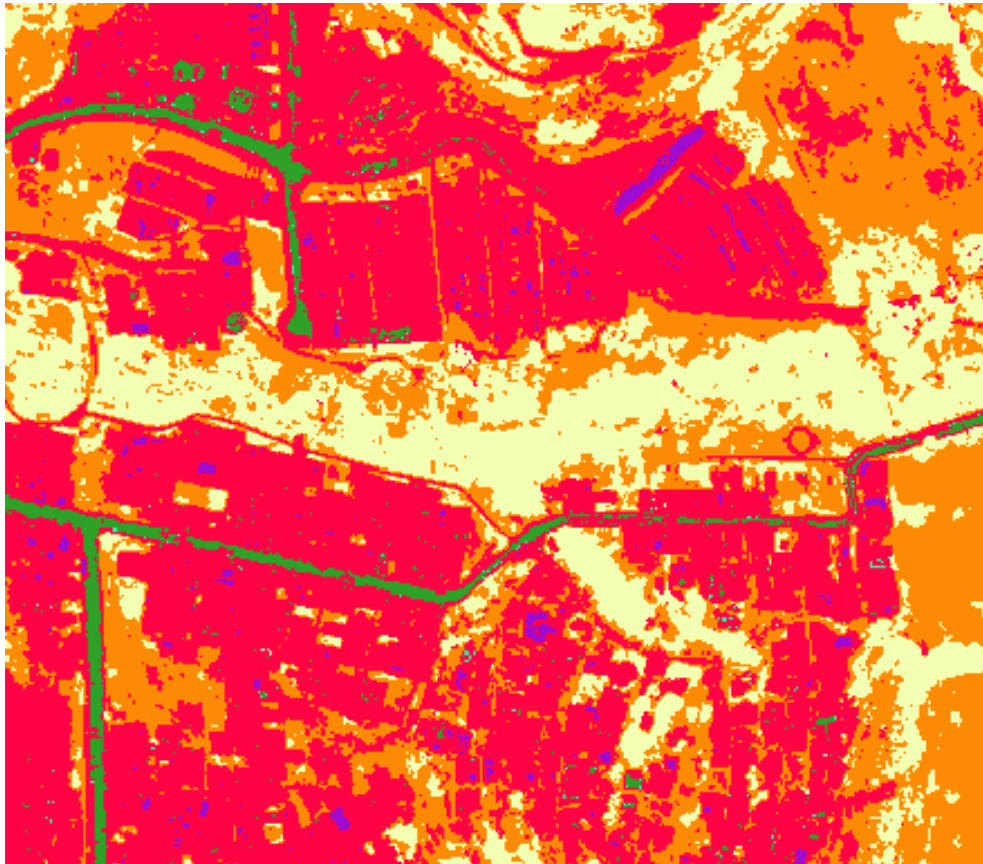


Figura 33. Detalles de la Clasificación supervisada MAXLIKE.

Los valores generados en la identificación del asbesto y carretera obtuvieron resultados similares, por esta razón este algoritmo también tuvo una clara dificultad en diferenciar estos dos materiales con las pequeñas áreas de entrenamiento definidas previamente.

6.5.2.4. FISHER (Análisis discriminante lineal)

En este algoritmo, al ser uno de los más robustos por su análisis discriminante lineal del sitio de entrenamiento, se puede destacar una clasificación a simple vista óptima entre las clases definidas inicialmente.

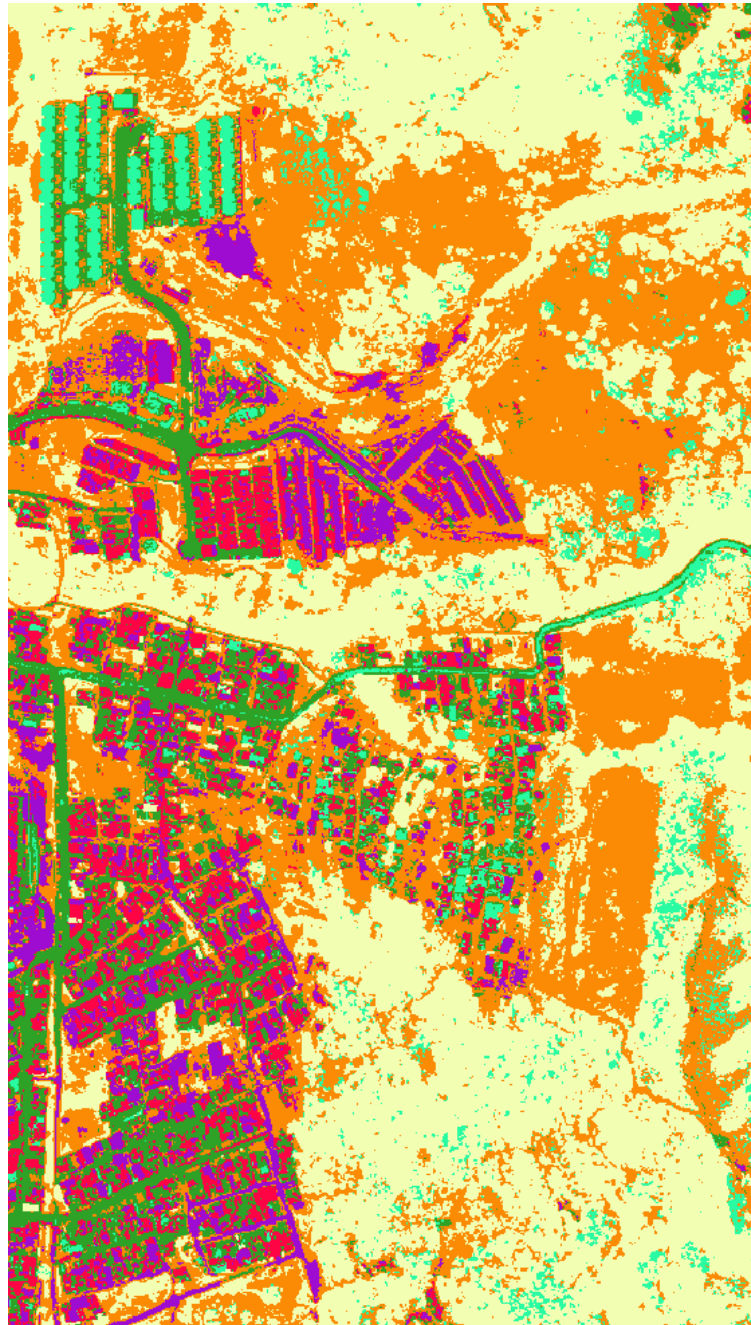


Figura 34. Clasificación supervisada FISHER.

En la figura 34 se puede analizar que este método de clasificación proporcionó una de las clasificaciones más acertadas a simple vista, se observa que el algoritmo pudo diferenciar los diferentes tipos de techos.

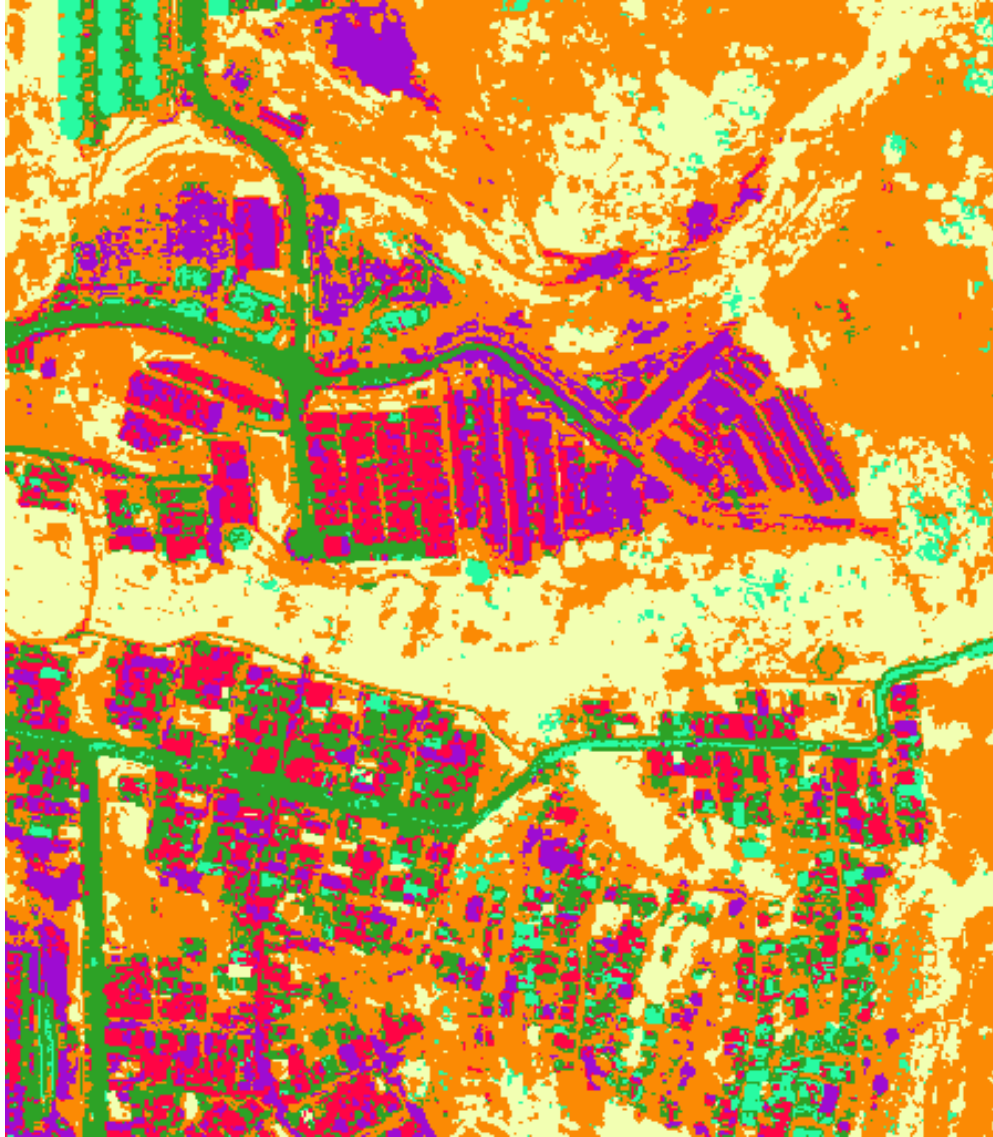


Figura 35. Detalles de la Clasificación supervisada FISHER.

Al analizar en detalle en la figura 35, se puede observar que en el área de entrenamiento se identifica una gran proporción de asbesto, esto puede atribuirse a que el algoritmo hace una regresión lineal de cada clase definiendo un comportamiento específico para cada material, de este modo con las bandas que fueron procesadas se puede observar una asignación pertinente a cada píxel de entrenamiento, esto se debe principalmente a que recibe más apoyo de los píxeles delimitados inicialmente.

6.5.2.5. Árboles Aleatorios (Random Trees)

En este algoritmo a simple vista se puede observar una clasificación destacada en el sector de entrenamiento en la figura 36, esta clasificación se generó con un máximo de 50 árboles, debido a que este presentó los mejores resultados con las clases de entrenamiento definidas previamente.

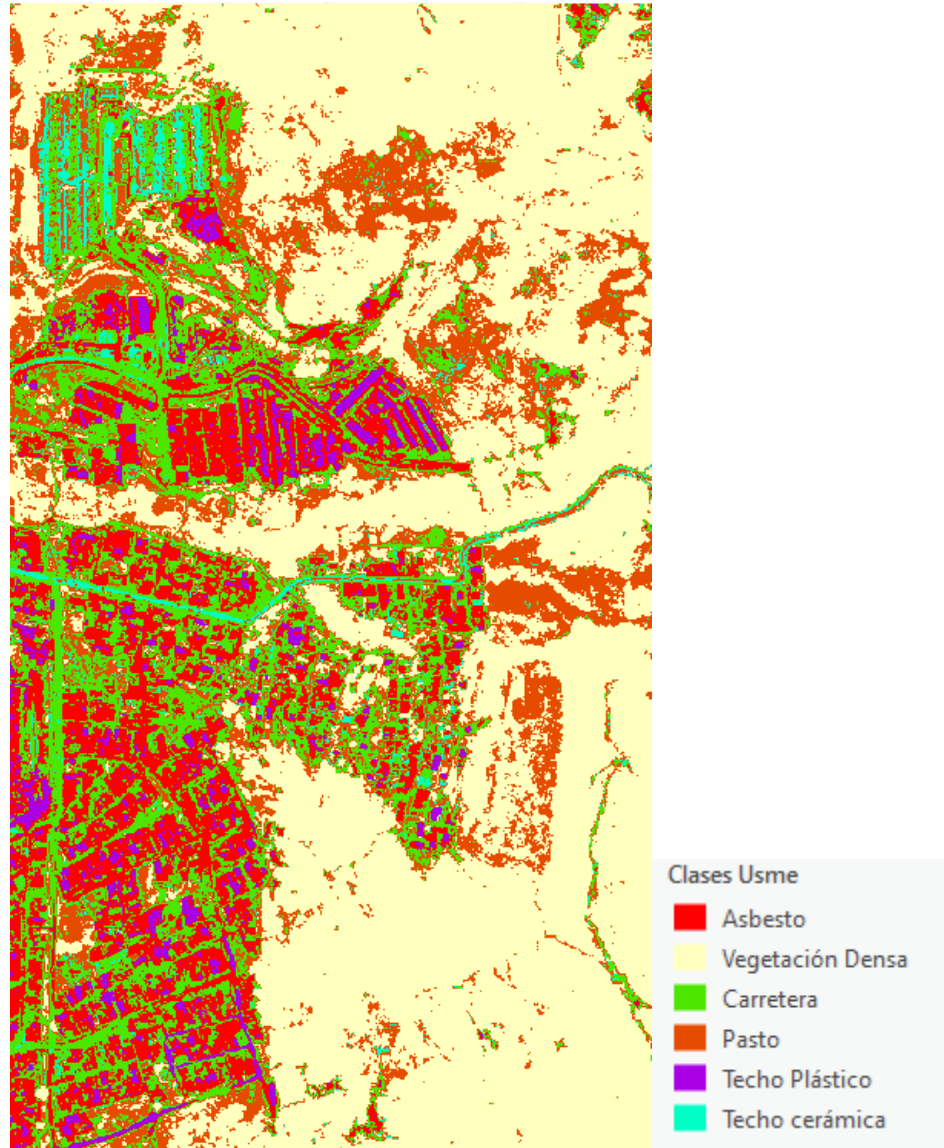


Figura 36. Clasificación supervisada Árboles Aleatorios.

En la figura 37 se puede detallar como se asigna a cada píxel a gran parte de las zonas definidas como asbesto en el entrenamiento, aunque se puede observar que se confunde parte de la carretera como cubierta de asbesto.

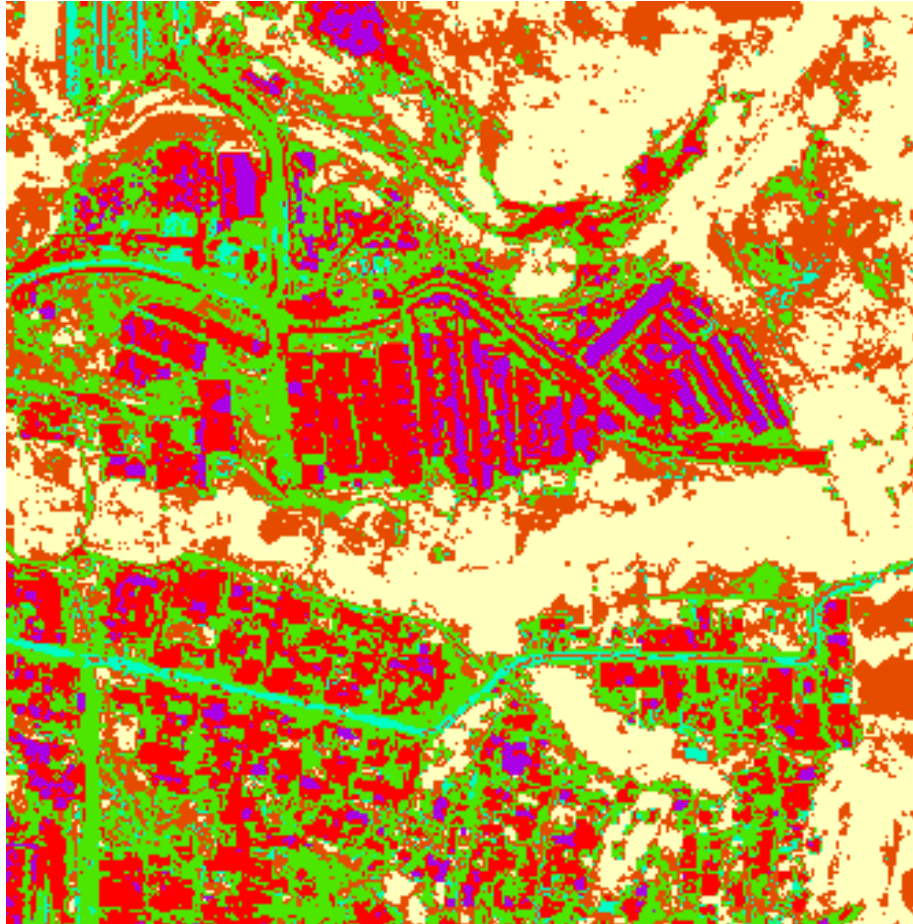


Figura 37. Detalles de la Clasificación supervisada Árboles Aleatorios.

Esta clasificación se entrena a partir de las clases de entrenamiento definidas, dando mayor importancia a las que tuvieron mayor votación.

6.5.2.6. SVM (Máquina de Vectores de Soporte)

Este algoritmo a simple vista proporciono una buena clasificación sobre la zona de entrenamiento, en esta se determinaron un número máximo de 500 muestras por cada clase, se puede observar en la figura 38 cómo se categoriza las clases aunque tiene cierta dificultad en diferenciar los techos de asbesto y de plástico.

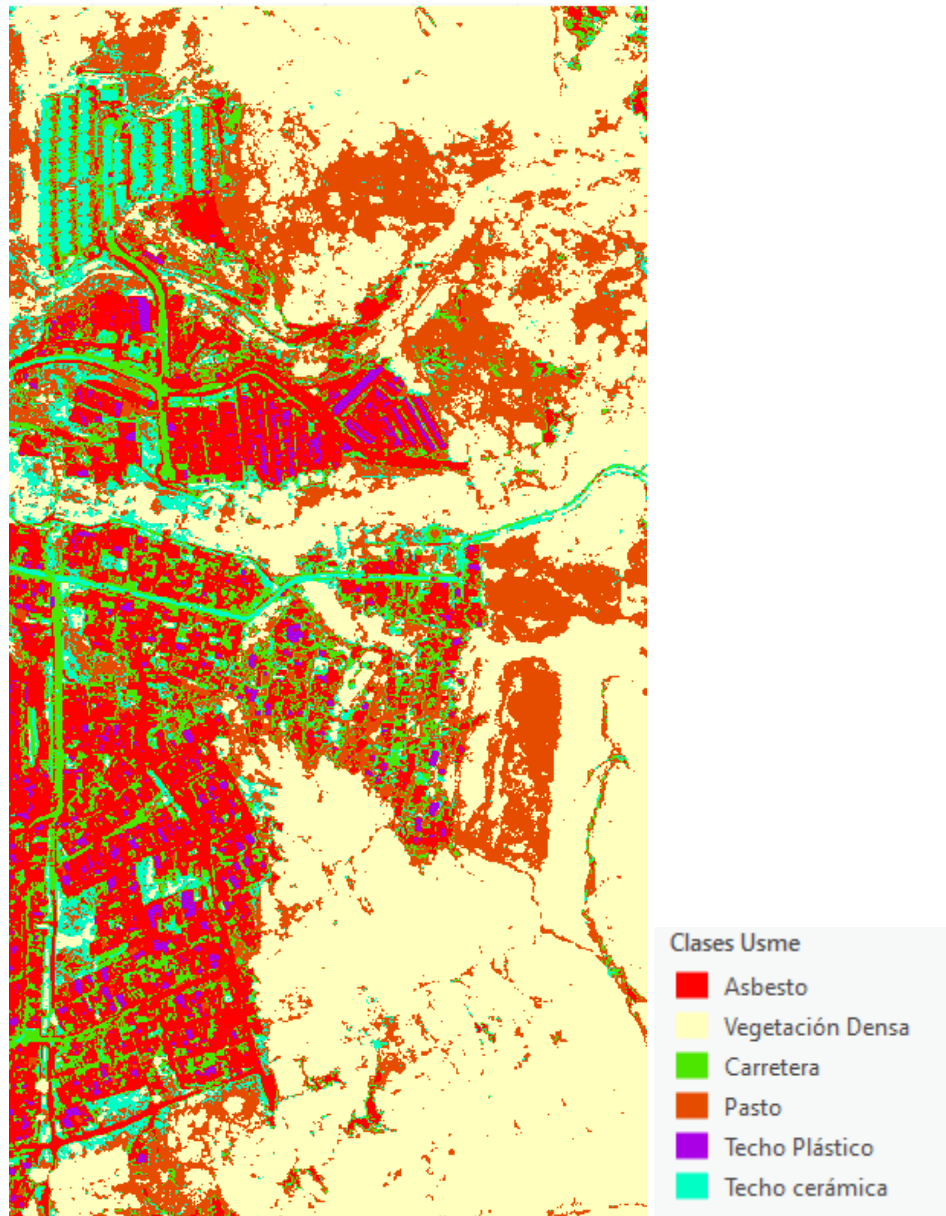


Figura 38. Clasificación supervisada SVM.

En la figura 39 se puede analizar con más detalle la clasificación resultante, se puede analizar que el algoritmo con la cantidad de muestras proporcionadas en el entrenamiento fue capaz de reconocer una amplia zona de este, sin embargo tuvo dificultades en diferenciar el asbesto de otros materiales urbanos. Es posible que este clasificador tuviera un mejor desempeño con una imagen de mayor resolución.

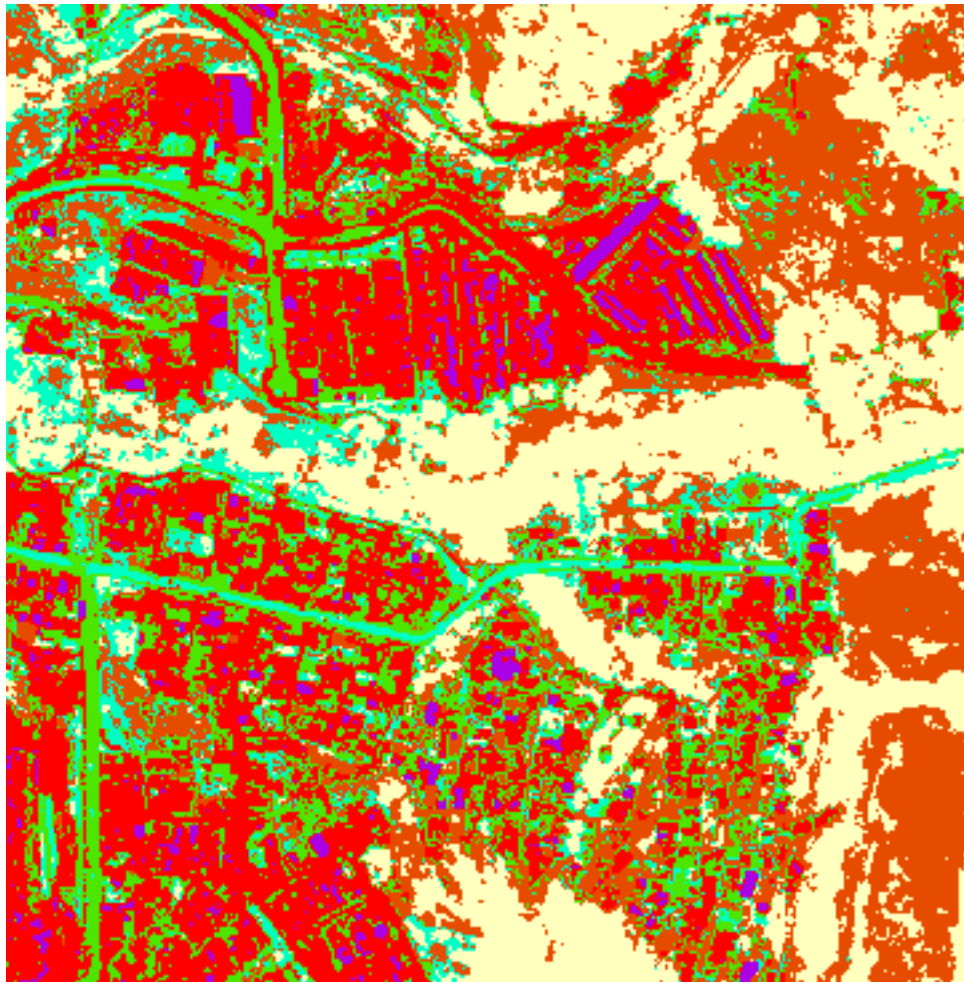


Figura 39. Detalles de la Clasificación supervisada SVM.

6.6. Validación

Para poder validar los resultados obtenidos de cada clasificación se procedió a comparar los resultados de cada clasificación supervisada con los datos de control, estos datos de control fueron determinados en la salida de campo. Para realizar este procedimiento se procede a generar un polígono de control como se puede observar en la figura 40.



Figura 40. Polígono de control para la validación.

El polígono sirve como referencia para recortar de la imagen generada de cada clasificación supervisada el sector de entrenamiento, este previamente fue identificado en la salida de campo por tener techos con fibrocemento compuesto de asbesto.

En la figura 41 se puede observar el recorte generado de la imagen de una de las clasificaciones realizadas, en esta podemos ver que las coordenadas corresponden al polígono delimitado previamente.



Figura 41. Recorte de la clasificación generada sobrepuesta en el área de entrenamiento.

Con la imagen generada, se realiza una exportación de la información de la caracterización estadística de cada clase cómo se puede ver en la figura 42, en la cual se genera una tabla que corresponde a la información clasificada a partir de los valores de cada pixel, esta tabla muestra la cantidad de perímetro y grosor correspondiente a cada clase. El subsistema de análisis de datos será el responsable de procesar la información y evaluar los resultados de la clasificación del asbesto.



Figura 42. Método Zonal Geometry as a table aplicado a la clasificación.

Los datos generados de cada clasificación se exportaron como un archivo de texto, de este modo se importan en un archivo *Excel* delimitado por punto y coma, en el cual se consolidan todos resultados conseguidos de cada clasificación como se puede ver en la figura 43, en el [Anexo V - Validación de Clasificación Supervisada](#) se establece en detalle los datos correspondientes que tuvo cada clasificación y su exactitud. La escala definida como excelente, sobresaliente e insuficiente, corresponde a la identificación inicial, la cual determinó una cantidad aproximada del asbesto en el polígono delimitado, este generó la escala de la

clasificación en la cual los rangos corresponden a una calificación que determina la precisión de los clasificadores utilizados.

#	Algoritmos	Clasificación de asbesto	Excelente	Sobresaliente	Insuficiente
			35% - 45%	45% - 50%	< 35% o >50%
1	Maxlike	55,43%			
2	Fisher	41,41%			
3	SVM	48,54%			
4	Random Trees	48,65%			
5	Piped	46,94%			
6	Mindist	45,99%			

Zona de entrenamiento:



En la imagen se clasificó manualmente la cantidad de píxeles pertenecientes al asbesto con una valor aproximado de 43%, el otro 57% corresponde a otro tipo de superficies.

Figura 43. Resultados generales de las clasificaciones supervisadas.

Como se puede observar en la figura 44 para cada algoritmo se realizó un cálculo simple en donde se establece, de las clases identificadas con una proporción a cada clase, es decir, cual es el porcentaje que identificó de los materiales representados.

Clases	VALUE	PERIMETER	THICKNESS	
Asbesto	1	0,0144288	0,0000486	41,41%
Vegetación Densa	2	0,0001296	0,0000054	0,37%
Carretera	3	0,0096336	0,000027	27,65%
Pasto	4	0,0050544	0,0000229	14,51%
Techo plástico	5	0,005292	0,0000184	15,19%
Techo cerámica	6	0,0003024	0,0000054	0,87%
TOTAL		0,0348408	0,0001277	

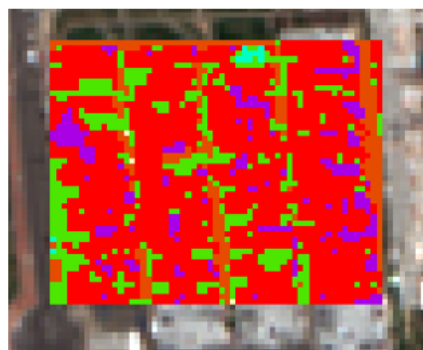


Figura 44. Proporción de cada tipo de cubierta clasificada.

6.7. Integración con un SIG (Sistema de Información Geográfico)

En la figura 45 se puede observar todas las herramientas y recursos informáticos que se establecieron para llevar a cabo el procedimiento metodológico, se puede detallar en la parte superior todas las herramientas que se utilizaron en este sistema, a continuación, se especifica el software utilizado y su finalidad.

6.7.1. Software para el procesamiento de fotografía aérea

Los siguientes programas se utilizaron para realizar el procesamiento fotogramétrico de las fotografías aéreas, esto con el fin de generar mapas de visualización 3D y consolidar las fotografías verticales tomadas del dron en un ortomosaico con los detalles de cada foto.

- *Agisoft Photo Scan*
- *Pix4D*

6.7.2. Software para el procesamiento de imágenes satelitales

Estos programas se utilizaron para realizar todo el procesamiento de las imágenes satelitales, en generar las clasificaciones supervisadas y finalmente integrar la información generada en un sistema de información geográfico.

- *IDRISI selva*
- *Arcgis Pro*
- *ArcGIS Online*

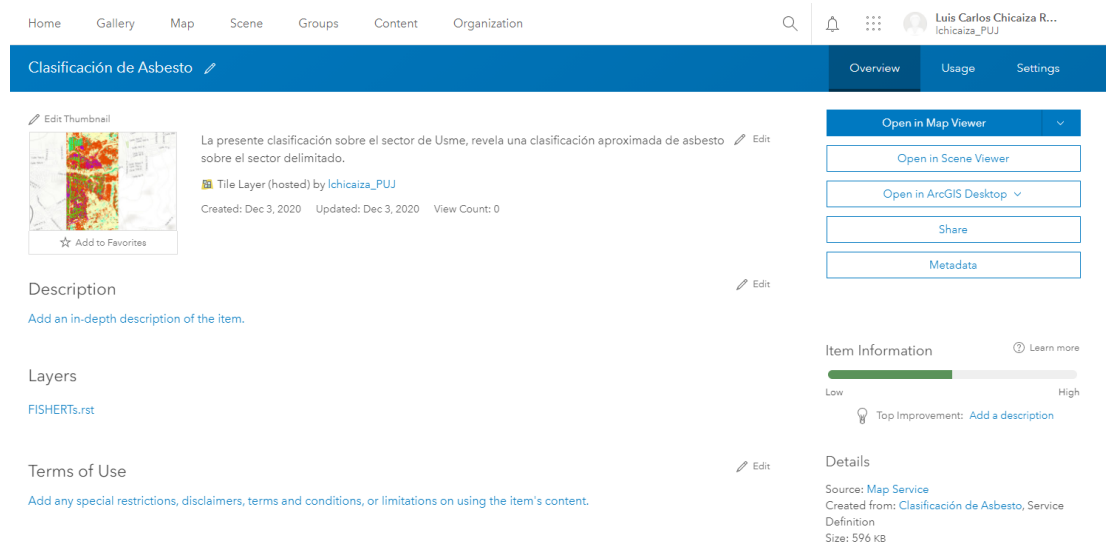


Figura 45. Sistema propuesto relacionado con las herramientas elegidas.

6.7.3. Integración

Al generar todas las clasificaciones propuestas según el procedimiento metodológico establecido y posteriormente efectuarse la validación de cada algoritmo, se determinó que la clasificación con los mejores resultados fue la clasificación *FISHER*, de este modo se procedió a integrar los datos obtenidos de esta clasificación a un sistema de información geográfico.

Este procedimiento empezó con una cuenta registrada en *arcGIS Online*, en la cual se cargó la clasificación como un *web layer* mediante el software *ArcGIS pro*, en la figura 46 se puede observar la integración al sistema de información geográfico.



The screenshot displays the ArcGIS Online interface for an item titled "Clasificación de Asbesto". The navigation bar at the top includes "Home", "Gallery", "Map", "Scene", "Groups", "Content", and "Organization". The user profile "Luis Carlos Chicaiza R... Ichicaiza_PUJ" is visible in the top right. The item page features a blue header with "Overview", "Usage", and "Settings" tabs. Below the header, there is a thumbnail of the map, a description, a "Tile Layer (hosted) by Ichicaiza_PUJ" label, and creation/update dates. The "Description" section is currently empty. The "Layers" section shows "FISHERTs.rst". The "Item Information" section includes a progress bar and a "Top Improvement" prompt. The "Details" section provides source, creation, and size information.

Figura 46. Infraestructura web de arcGIS para compartir y crear mapas con la comunidad.

Una vez subida la clasificación en la organización, se procedió a desplegar y guardar el mapa de clasificación con unas etiquetas, las cuales son clave para que personas que estén registradas en la organización y/o comunidad de *arcGIS* puedan acceder al mapa de clasificación, como se puede ver en la figura 47 y figura 48.

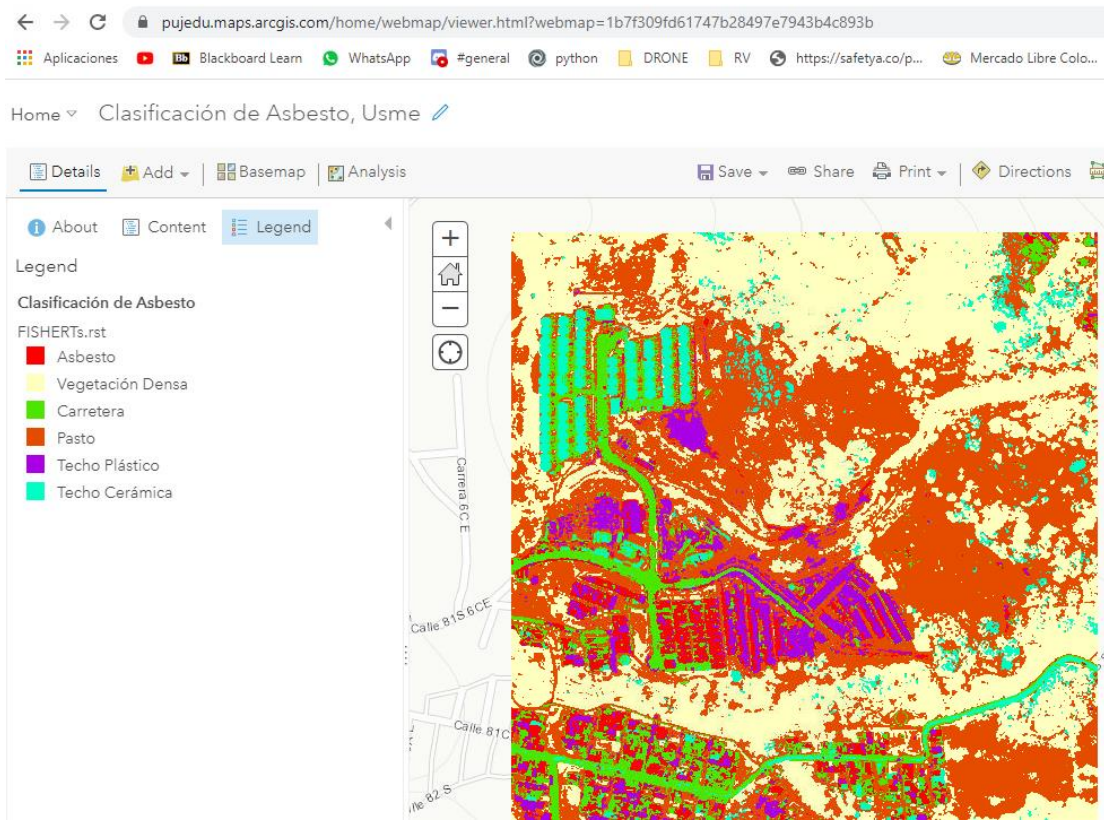


Figura 47. Mapa de clasificación desplegado en el SIG.

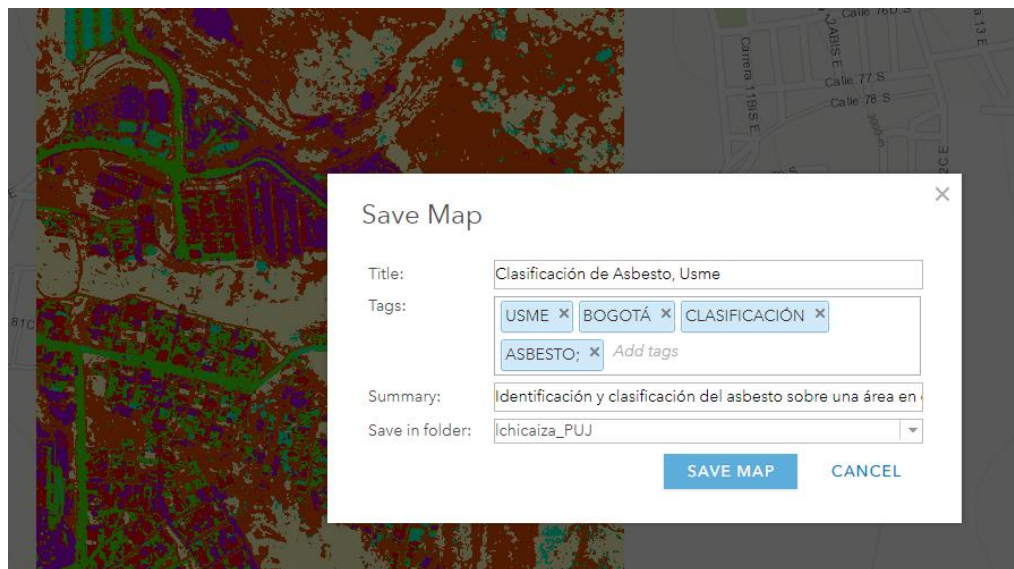


Figura 48. Etiquetas establecidas en el mapa de clasificación.

6.7.4. Construcción de Interfaz de consulta

Para que la información generada del mapa de clasificación del asbesto pueda ser visto por un público ajeno a la organización, se construyó en *ArcGis Experience Builder* una interfaz de consulta para publicar la clasificación del asbesto, en la figura 49 se ilustra cómo se estableció una plantilla base para integrar los datos del mapa de clasificación de asbesto.

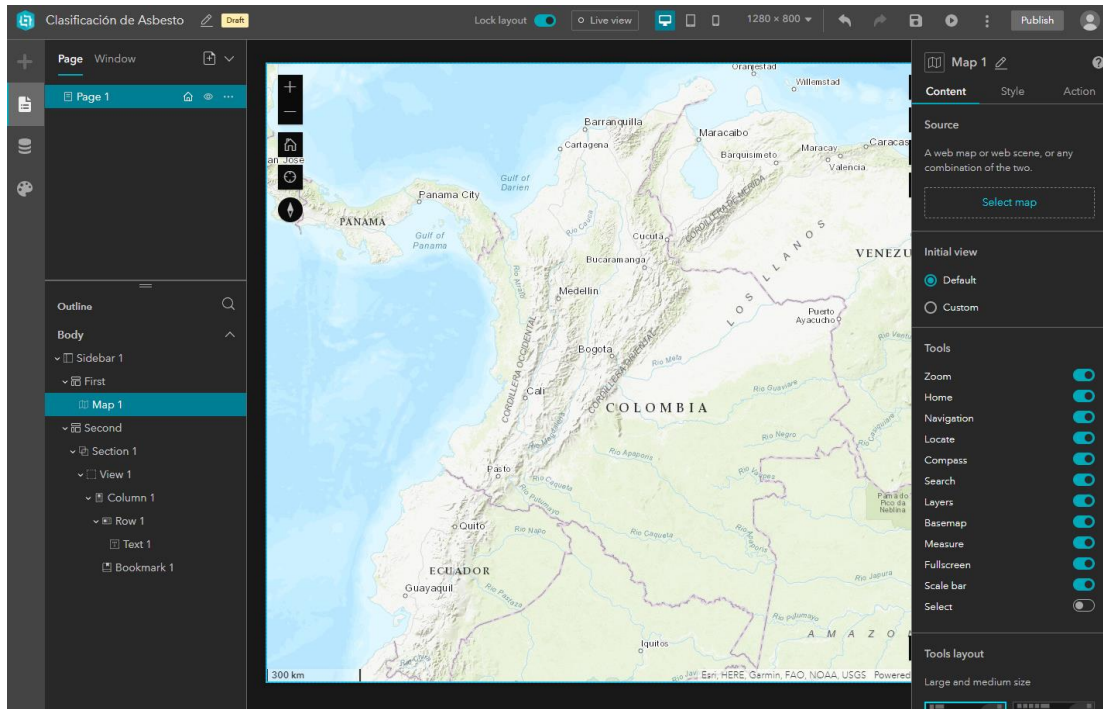


Figura 49. Plantilla base construida.

El mapa de clasificación se publicó como una aplicación web, en donde se puede acceder desde diferentes dispositivos con acceso a internet. En la figura 50 y 51 se puede observar la interfaz de consulta generada, la cual permite identificar las clases definidas.

- El enlace del proyecto se puede consultar por el siguiente hipervínculo: <https://arcg.is/OWC1Hu0>
- También puede desplegarse directamente del siguiente enlace: <https://experience.arcgis.com/experience/76e386ac09634b8f837620e92aac28d1>

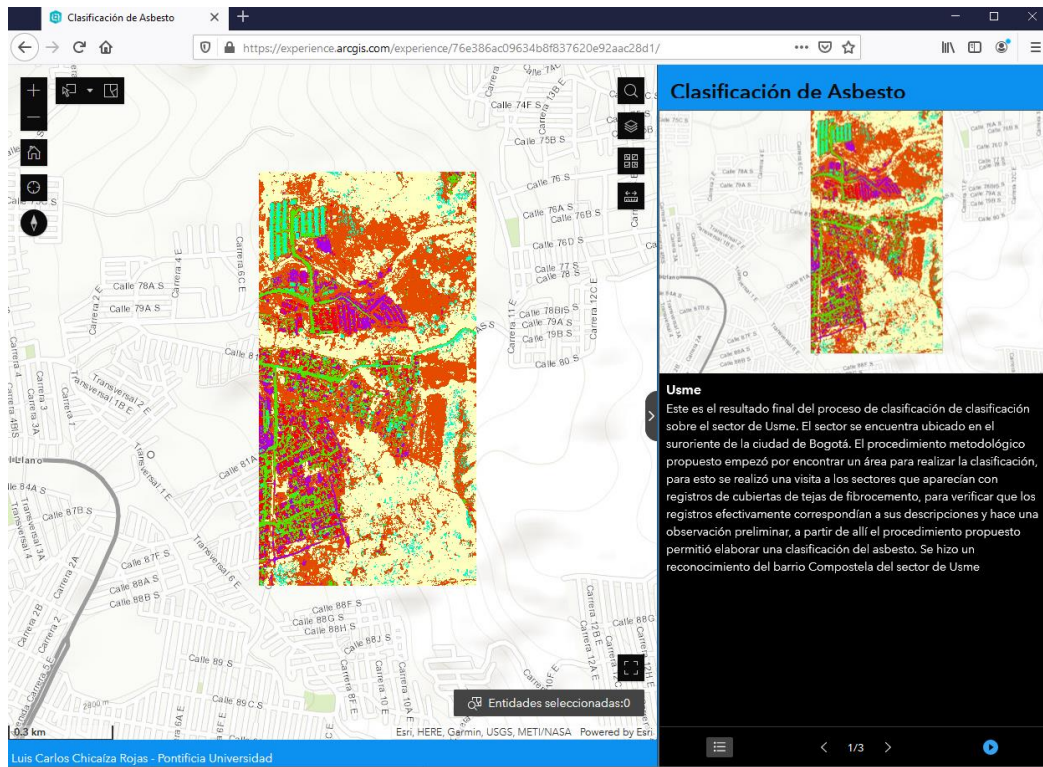


Figura 50. Interfaz de consulta sobre la clasificación de asbesto.

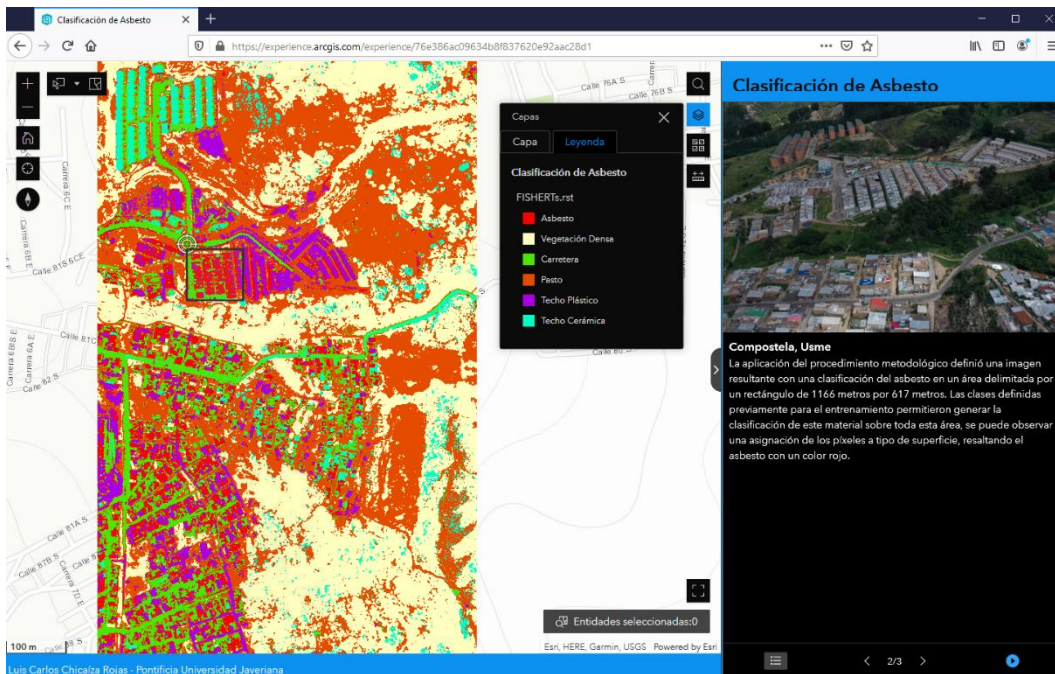


Figura 51. Interfaz de consulta sobre la clasificación de asbesto.

7. CONCLUSIONES

Las imágenes satelitales han sido una herramienta de gran utilidad para identificar grandes superficies terrestres, la gran cantidad de información que suministran las imágenes multiespectrales han sido muy relevantes para la identificación y clasificación de superficies como por ejemplo para la clasificación de vegetación y de zona urbana.

Las investigaciones y artículos relacionados definieron métodos para la identificación de diversos materiales, encontrando en ciertos casos particulares la identificación y clasificación del asbesto, a partir de esto, se desarrolló un procedimiento metodológico el cual permitiera realizar la clasificación propuesta.

Al evaluar proyectos relacionados con la identificación del asbesto en Colombia mediante el uso de imágenes satelitales, no se evidenció una metodología que aplicara estos conceptos para la clasificación del asbesto, sin embargo, algunos artículos de países extranjeros demuestran soluciones haciendo uso de imágenes hiperespectrales aunque cabe destacar que en estos no se evidencia una clara aplicación práctica de una metodología que permita identificar este material.

Los procedimientos relacionados entorno al procesamiento de imágenes satelitales y a los resultados que se pueden conseguir al aplicar ciertos algoritmos o herramientas, funcionaron como punto de referencia en donde se definieron y aplicaron los principales conceptos para la identificación del asbesto en techos o superficies.

De esta forma se diseñó y estableció un sistema con un procedimiento metodológico que define una serie de condiciones, restricciones e insumos necesarios, para poder establecer una clasificación del asbesto. Específicamente se consolidó una guía para realizar la identificación del asbesto a partir de un procedimiento detallado en el cual la firma espectral mostraba el comportamiento del asbesto en función de la longitud de onda reflejada lo que garantizó una adecuada identificación y en consecuencia facilitó la labor de los algoritmos utilizados para clasificar el asbesto de una zona urbana, más específicamente en el barrio Ciudadela Boloña en Usme.

Finalmente, esta clasificación fue validada e integrada en un sistema de información geográfico el cual puede ser accedido por cualquier público, como también en la creación e implementación de una interfaz de consulta que muestra la clasificación final, además de que permite detallar los aspectos más importantes de la clasificación.

Al realizar la clasificación supervisada se determinó que el algoritmo que tuvo uno de los mejores resultados fue *FISHER*, debido a que proporcionó una de las mejores clasificaciones de asbesto según el procedimiento de validación, cabe destacar que este tuvo un comportamiento excelente en clasificar los otros tipos de superficies terrestres.

Las clasificaciones realizadas con el algoritmo *MINDIST* a pesar de tener pocas zonas de entrenamiento lograron generar una clasificación sobresaliente.

El algoritmo SVM tuvo un adecuado reconocimiento del asbesto, aunque con algunas dificultades al diferenciar este material de carreteras y otras zonas urbanas.

El algoritmo PIPED también generó resultados sobresalientes en el momento de especificar el asbesto de manera rigurosa, cabe destacar que al reconocer píxeles que no correspondían a ninguna clase definida en el entrenamiento no lo clasificó, dejando específicamente una clasificación que estrictamente cumplía con los polígonos de entrenamiento.

El uso del sistema propuesto puede brindar a una organización o personal interesado encontrar asbesto en cualquier zona urbana, siempre y cuando se siga con las condiciones establecidas del procedimiento metodológico el cual considera la integración de varios recursos informáticos.

A futuro y como ejemplo de una posible aplicación práctica, se podría utilizar el sistema para ayudar a determinar la población vulnerable y generar información que permita a las personas u organizaciones interesadas, cuantificar la presencia de asbesto en las correspondientes edificaciones.

En general se puede definir que la puesta en marcha de una metodología con el propósito de identificar el asbesto de manera automática a través del uso de imágenes satelitales y apoyado con fotografías aéreas, puede ofrecer alternativas de solución desde ambientes tecnológicos a problemas relacionados con la identificación del asbesto, en ese sentido, el apoyo de una metodología aplicada es de gran ayuda para facilitar la clasificación del asbesto.

8. REFERENCIAS

- [1] Identificación de Vegetación en imágenes Satelitales. Autora: Luciana Perez Cortés: [En Línea] Disponible en: <https://tesis.ipn.mx/bitstream/handle/123456789/18056/Identificacion%20de%20vegetacion%20en%20imagenes%20satelitales.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [2] Metodología para ajustar clasificaciones supervisadas de imágenes satelitales, una contribución a la conservación del gorrión serrano. Autor: Rodrigo Javier Vázquez [En Línea] Disponible en: <http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/7474/Tesis%20Rodrigo%20V%C3%A1zquez%20de%20la%20Torre.pdf?sequence=1>
- [3] Aplicaciones y retos del sensado remoto hiperespectral en la geología colombiana [En Línea] Disponible en: <http://www.scielo.org.co/pdf/rfing/v24n40/v24n40a03.pdf> Bonifazi G, Capobianco G, Serranti S. Asbestos containing materials detection and classification by the use of hyperspectral imaging. J Hazard Mater. 2018;344:981-993. doi:10.1016/j.jhazmat.2017.11.056 Available at <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/29207357>
- [4] Elaboración de un manual de operaciones para la captura de “firmas espectrales” en campo, validada en dos granjas experimentales. Autor: Mateo Damián López Espinoza [En Línea] Disponible en: <http://dspace.ucuenca.edu.ec/bitstream/123456789/20916/1/TESIS.pdf>
- [5] Firmas espectrales de la cobertura de la Tierra, aplicando radiometría de campo. Fase I: Región 03 occidente de Honduras. Autores: Rafael Enrique Corrales Andino - Vilma Lorena Ochoa López [En Línea] Disponible en: <https://www.lamjol.info/index.php/CE/article/view/2527/2282>
- [6] Bonifazi G, Capobianco G, Serranti S. Asbestos containing materials detection and classification by the use of hyperspectral imaging. J Hazard Mater. 2018;344:981-993. doi:10.1016/j.jhazmat.2017.11.056 Available at <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/29207357>
- [7] Ossa Giraldo, Ana Claudia, Gómez Gallego, Diana Maryory, & Espinal Correa, Claudia Elena. (2014). Asbesto en Colombia: un enemigo silencioso. Iatreia, 27(1), 53-62. Retrieved August 10, 2020, Available at http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0121-07932014000100006&lng=en&tlng=es
- [8] Agency for Toxic Substances and Disease Registry. Health Effects of Asbestos. Retrieved August 10, 2020. Available at https://www.atsdr.cdc.gov/asbestos/health_effects_asbestos.html
- [9] Isidro Montesa, K. Abu Shamsb, E. Aldayc, JL. Carretero Sastred, J. Ferrer Sanchoe, A. Freixa Blanxartf, E. Monsó Molasg, I. Pascal Martínezb, E. Rodríguez Becerrah, F. Rodríguez Panadero. Normativa sobre el asbesto y sus enfermedades pleuropulmonares. Retrieved August 10, 2020, Available at <https://www.archbronconeumol.org/es-normativa-sobre-el-asbesto-sus-articulo-13071586>
- [10] Camacho, Ariolfo & Vargas-García, Cesar & Rojas Morales, Fernando A. & Castillo-Castelblanco, Sergio & Arguello, Henry. (2015). Aplicaciones y retos del sensado remoto hiperespectral en la geología colombiana. REVISTA FACULTAD DE INGENIERÍA. 24. 17. 10.19053/01211129.3845. Available at: <http://www.scielo.org.co/pdf/rfing/v24n40/v24n40a03.pdf>
- [11] Krówczyńska, Małgorzata & Wilk, Ewa & Pabjanek, Piotr & Kycko, Marlena. (2017). Hyperspectral discrimination of asbestos-cement roofing. Geomatics and Environmental Engineering. 11. 47. 10.7494/geom.2017.11.1.47. Available at: https://www.researchgate.net/publication/321637553_Hyperspectral_discrimination_of_asbestos-cement_roofing
- [12] Szilárd Szabó, Péter Burai, Zoltán Kovács, György Szabó, Attila Kerényi, István Fazekas, Mónika Paládi, Tamás Buday, Gergely Szabó. Testing algorithms for the identification of asbestos roofing based on hyperspectral data. Available at: https://www.researchgate.net/publication/270105262_Testing_algorithms_for_the_identification_of_asbestos_roofing_based_on_hyperspectral_data [5]
- [13] Cilia, Chiara & Panigada, Cinzia & Rossini, Micol & Candiani, Gabriele & Pepe, Monica & Colombo, Roberto. (2015). Mapping of Asbestos Cement Roofs and Their Weathering Status Using Hyperspectral Aerial Images. ISPRS International Journal of Geo-Information. 4. 928-941. 10.3390/ijgi4020928. Consultado: 27 de diciembre de 2019. Available at: https://www.researchgate.net/publication/277885140_Mapping_of_Asbestos_Cement_Roofs_and_Their_Weathering_Status_Using_Hyperspectral_Aerial_Images
- [14] Krówczyńska, Małgorzata & Wilk, Ewa & Pabjanek, Piotr & Zagajewski, Bogdan & Meuleman, Koen. (2016). Mapping asbestos-cement roofing with the use of APEX hyperspectral airborne imagery: Karpacz area, Poland - A case study. Miscellanea Geographica. 20. 41-46. 10.1515/mgrsd-2016-0007. Consultado: 27 de diciembre de 2019. Available at:

- https://www.researchgate.net/publication/301527313_Mapping_asbestos-cement_roofing_with_the_use_of_APEX_hyperspectral_airborne_imagery_Karpacz_area_Poland_-_A_case_study
- [15] Nasarudin, N.E., & Shafri, H.Z. (2011). DEVELOPMENT AND UTILIZATION OF URBAN SPECTRAL LIBRARY FOR REMOTE SENSING OF URBAN ENVIRONMENT. *Journal of Urban and Environmental Engineering*, 5, 44-56. Available at: <https://www.semanticscholar.org/paper/DEVELOPMENT-AND-UTILIZATION-OF-URBAN-SPECTRAL-FOR-Nasarudin-Shafri/67bf352a51ef6426363d73d74091dcbfb7a5da0e>
- [16] Basile Giannini, Massimiliano & Creta, Teresa & Guglietta, Daniela & Merola, Pasquale & Allegrini, Alessia. (2012). Methodologies to identify asbestos-cement roofing by remote data. *European Journal of Remote Sensing*. 44. 10.5721/ItJRS20124413. Available at: https://www.researchgate.net/publication/263697494_Methodologies_to_identify_asbestos-cement_roofing_by_remote_data
- [17] Henry Omar A. Castellanos-Quiroz, Héctor Mauricio Ramírez-Daza & Yulia Ivanova. Detección de zonas mineras a cielo abierto aplicando índices espectrales y técnicas de fusión de imágenes. <https://doi.org/10.15446/dyna.v84n201.60368>
- [18] José Antonio Valero-Medina, Cristian David Dallos-Bustos & Ivan Lizarazo. Un nuevo enfoque para la clasificación de imágenes multispectrales basado en complejos cartesianos. DOI: <https://doi.org/10.15446/dyna.v85n204.66161>
- [19] Tommasini, M., Bacciottini, A., & Gherardelli, M. (2019). A QGIS Tool for Automatically Identifying Asbestos Roofing. *ISPRS Int. J. Geo-Information*, 8, 131. Available at: <https://www.semanticscholar.org/paper/A-QGIS-Tool-for-Automatically-Identifying-Asbestos-Tommasini-Bacciottini/2c7f2cd9f9dffefadb23ff9c2306d1db91f8a16>
- [20] Frassy, Federico & Candiani, Gabriele & Rusmini, Marco & Maianti, Pieralberto & Marchesi, Andrea & Rota Nodari, Francesco & Dalla Via, Giorgio & Albonico, Carlo & Gianinetta, Marco. (2014). Mapping Asbestos-Cement Roofing with Hyperspectral Remote Sensing over a Large Mountain Region of the Italian Western Alps. *Sensors (Basel, Switzerland)*. 14. 15900-15913. 10.3390/s140915900. Available at: https://www.researchgate.net/publication/265134993_Mapping_Asbestos-Cement_Roofing_with_Hyperspectral_Remote_Sensing_over_a_Large_Mountain_Region_of_the_Italian_Western_Alps
- [21] Cristiana Bassani, Rosa Maria Cavalli, Francesco Cavalcante, Vincenzo Cuomo, Angelo Palombo, Simone Pascucci, Stefano Pignatti. Deterioration status of asbestos-cement roofing sheets assessed by analyzing hyperspectral data. Consultado: 27 de diciembre de 2019. Available at: https://www.academia.edu/29296397/Deterioration_status_of_asbestos_cement_roofing_sheets_assessed_by_analyzing_hyperspectral_data
- [22] Carmine Massarelli, Raffaella Matarrese, Vito Felice Uricchio, Maria Rita Muolo, Maurizio Laterza & Leanna Ernesto (2017) Detection of asbestos-containing materials in agro-ecosystem by the use of airborne hyperspectral CASI-1500 sensor including the limited use of two UAVs equipped with RGB cameras, *International Journal of Remote Sensing*, 38:8-10, 2135-2149, DOI: 10.1080/01431161.2016.1226528 Available at: <https://www.tandfonline.com/action/showCitFormats?doi=10.1080%2F01431161.2016.1226528>
- [23] M. Hendrickx (2009) Carbonate-hosted asbestos occurrences in South Australia: review of geology and implications for mesothelioma, *Australian Journal of Earth Sciences*, 56:5, 639-654, DOI: 10.1080/08120090902825172 Available at: <https://www.tandfonline.com/action/showCitFormats?doi=10.1080%2F08120090902825172>
- [24] John A. Richards (2018) *Geometric Processing and Enhancement: Image Domain Techniques on Remote Sensing Digital* (pp. 127-159) *Remote Sensing Digital Image Analysis*. Springer Science & Business Media
- [25] J. Ronald Eastman (2012) *Supervised Classification* (pp. 179-193) *IDRISI Selva Tutorial* Clark University
- [26] PINILLA, C. 1995. *Elementos de Teledetección*. Ra-Ma, D.L. Madrid, 238 pp
- [27] Comprender el análisis de distancia euclidiana, ArcGIS for Desktop. (2020). Retrieved 7 October 2020, from <https://desktop.arcgis.com/es/arcmap/10.3/tools/spatial-analyst-toolbox/understanding-euclidean-distance-analysis.htm>
- [28] Preparar clasificador de máquina de vectores de soporte, ArcGIS for Desktop. (2020). Retrieved 7 Dece October 2020, from <https://desktop.arcgis.com/es/arcmap/10.3/tools/spatial-analyst-toolbox/train-support-vector-machine-classifier.htm>
- [29] Preparar clasificador de árboles aleatorios (Spatial Analyst) ArcMap | Documentación. (2020). Retrieved 7 November 2020, from <https://desktop.arcgis.com/es/arcmap/latest/tools/spatial-analyst-toolbox/train-random-trees-classifier.htm>

9. ANEXOS

Anexo I – Investigación preliminar

Este anexo se encuentra adjunto en carpeta Anexos de los entregables, se puede consultar en el siguiente enlace:

[Entrega Final TG - Luis Carlos Chicaiza Rojas\Anexos](#)

Anexo II - Uso de imágenes satelitales para detección y cuantificación de asbesto

Este anexo se encuentra adjunto en carpeta Anexos de los entregables, se puede consultar en el siguiente enlace:

[Entrega Final TG - Luis Carlos Chicaiza Rojas\Anexos](#)

Anexo III – Requerimientos

Este anexo se encuentra adjunto en carpeta Anexos de los entregables, se puede consultar en el siguiente enlace:

[Entrega Final TG - Luis Carlos Chicaiza Rojas\Anexos](#)

Anexo IV - Fotografía área

Este anexo se encuentra adjunto en carpeta Anexos de los entregables, se puede consultar en el siguiente enlace:

[Entrega Final TG - Luis Carlos Chicaiza Rojas\Anexos](#)

Anexo V- Validación de clasificación supervisada

Este anexo se encuentra adjunto en carpeta Anexos de los entregables, se puede consultar en el siguiente enlace:

[Entrega Final TG - Luis Carlos Chicaiza Rojas\Anexos](#)
