



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

Método para la ortorrectificación de imágenes satelitales monoscópicas de muy alta resolución espacial empleando algoritmos evolutivos

Miguel Ángel Ramirez Gutierrez

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ciencias Agrarias, Maestría en Geomática
Bogotá D.C., Colombia
2020

Método para la ortorrectificación de imágenes satelitales monoscópicas de muy alta resolución espacial empleando algoritmos evolutivos

Miguel Angel Ramirez Gutierrez

Tesis o trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar al título de:
Magister en Geomática

Directora:

Ph.D. Erika Sofia Upegui Cardona

Codirector:

MsC. Camilo Alexander León Sanchez

Línea de Investigación:

Tecnologías Geoespaciales

Grupo de Investigación:

GEFEM: Grupo de estudio en temas de la física, de la estadística y la matemática

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Ciencias Agrarias, Maestría en Geomática

Bogotá D.C., Colombia

2020

A mis padres y hermanos quienes en este tiempo de emergencia sanitaria fueron mi apoyo.

Agradecimientos

Agradezco a la Subdirección de Geografía y Cartografía del Instituto Geográfico Agustín Codazzi - IGAC quienes facilitaron los datos necesarios para la realización de esta tesis, especialmente a la ingeniera Liliana Barrera Lombo quien desde el principio creyó en este proyecto y fue un importante apoyo para su ejecución. También agradezco al profesor Alizadeh Moghaddam por su asesoría y acompañamiento en la implementación de los algoritmos evolutivos, quien es autoridad en estos temas a nivel mundial. Un especial agradecimiento a los directores de este proyecto: la profesora Erika Upegui y al profesor Camilo León, gracias por su paciencia, su constante acompañamiento y por permitirme aprender bastante de ellos dos. Por último, quiero agradecer a la jefe de la oficina CIAF del IGAC Diana Galindo por siempre creer en este proyecto y en especial en mis aptitudes para su ejecución.

Resumen

La ortorrectificación de imágenes satelitales monoscópicas de muy alta resolución (VHR, por sus siglas en inglés) espacial es un proceso fundamental para asegurar la interoperabilidad de la información espacial obtenida a partir de ellas y más si se desea generar cartografía básica. Por lo anterior, estudios previos han utilizado distintos tipos de insumos entre los que se destacan múltiples fuentes de puntos de control y modelos digitales de elevación (DEM) de todo tipo, además de probar distintos métodos de optimización. Este trabajo de investigación tiene como objetivo usar de manera conjunta y evaluar la utilización de algoritmo evolutivo *Particle Swarm Optimization* (PSO), puntos estereoscópicos provenientes de bloques fotogramétricos y DEM de distintas fuentes, para la obtención de productos cartográficos de escala 1:10.000 comparando sus resultados con lo obtenido por mínimos cuadrados ordinarios (OLS, por sus siglas en inglés) que ofrece las soluciones comerciales más utilizadas en el mercado.

La metodología se compone de tres etapas. La primera corresponde al procedimiento de evaluación de DEM disponibles, generación de bloques fotogramétricos y puntos estereoscópicos junto al aseguramiento de la calidad de estos productos desde un enfoque fotogramétrico. La segunda etapa fue realizada la ortorrectificación de las imágenes monoscópicas VHR utilizando los módulos especializados de las soluciones comerciales (OLS) más utilizadas seleccionando el grado del apropiado del modelo de disposición espacial *Rational Functional Model* (RFM) con su correspondiente evaluación. La tercera y última etapa corresponde a los procesos necesarios para la estimación y selección de los coeficientes del modelo de disposición espacial RFM usando PSO y el método *Feature Condition Analysis* junto a todo el flujo necesario para la generación de la ortoimagen final junto a una validación de los supuestos estadísticos sobre los residuales.

Como resultado de los experimentos con OLS se observa que el uso de los puntos estereoscópicos es adecuado, pero el DEM influencia significativamente la exactitud posicional del producto final, a pesar de no ser adecuados para la escala objetivo. Además, cada algoritmo posee su propio procesamiento traducido en el resultado final y diferente modelo seleccionado, razón de la diferencia en los resultados, por lo que es necesario profundizar con mayor rigor en estos experimentos si se desea estudiar otros tipos de métodos de optimización. Mientras que con el uso del algoritmo PSO se observó mejora en promedio en un 3% la exactitud posicional de la ortoimagen sin embargo su utilización requiere de elevados recursos computacionales y además este tipo de método de optimización no se encuentra disponible aún en software especializado siendo difícil su implementación en masa de procesos productivos cartográficos.

Palabras clave: Ortorrectificación, Cartografía, OLS, PSO, FCA, VHR, RFM.

Abstract

The orthorectification of very high resolution (VHR) monoscopic spatial satellite images is a fundamental process to ensure the interoperability of the spatial information obtained from them. Therefore, previous studies have used different types of inputs, among which multiple sources of control points and digital elevation models (DEM) of all kinds stand out, in addition to testing different optimization methods. This research work aims to jointly use and evaluate the use of the evolutionary algorithm Particle Swarm Optimization (PSO), stereoscopic points from photogrammetric blocks and DEM from different sources, to obtain cartographic products of scale 1:10.000 comparing its results with that obtained by Ordinary Least Squares (OLS) that offers the most used commercial solutions.

The methodology is made up of three stages. The first stage corresponds to the available DEM evaluation procedure, generation of photogrammetric blocks and stereoscopic points, together with the quality assurance of these products from a photogrammetric approach. The second stage was performed the orthorectification of the monoscopic VHR images using the specialized modules of the most used commercial solutions (OLS), selecting the degree of the appropriate spatial arrangement model Rational Functional Model (RFM) with its corresponding evaluation. The third and last stage corresponds to the processes necessary for the estimation and selection of the coefficients of the RFM spatial arrangement model using PSO and the Feature Condition Analysis method together with all the necessary flow for the generation of the final orthoimage together to a validation of the statistical assumptions about the residuals.

As a result of the OLS experiments, it is observed that the use of stereoscopic points is adequate, but the DEM significantly influences the positional accuracy of the final product, despite not being suitable for the target scale. In addition, each algorithm has its own processing translated into the final result and a different selected model, which is the reason for the difference in the results, so it is necessary to delve more rigorously into these experiments if you want to study other types of optimization methods. While with the use of the PSO algorithm, an average 3% improvement in the positional accuracy of the orthoimage was observed; however, its use requires high computational resources and, furthermore, this type of optimization method is not yet available in specialized software. difficult its mass implementation of cartographic production processes.

Keywords: Orthorectification, Cartography, OLS, PSO, FCA, VHR, RFM

Contenido

Agradecimientos	vii
Resumen	ix
1. Introducción	1
1.1. Contexto	1
1.2. Planteamiento del problema	2
1.3. Aproximación conceptual	4
1.4. Preguntas de Investigación	5
1.5. Objetivos	5
1.5.1. Objetivo General	5
1.5.2. Objetivos Específicos	5
1.6. Importancia de la investigación	6
2. Marco Referencial	7
2.1. Marco Conceptual	7
2.1.1. Imágenes satelitales de muy alta resolución	7
2.1.2. Ortorrectificación o corrección geométrica	8
2.1.3. Modelos matemáticos de orrorrectificación utilizados en imágenes satelitales	11
2.1.4. Algoritmos evolutivos	12
2.1.5. Bloque fotogramétrico	16
2.1.6. Evaluación de la exactitud posicional de productos cartográficos.	18
2.2. Estado de arte	19
2.2.1. Tipo de insumos empleados en el proceso de orrorrectificación	19
2.2.2. Métodos de optimización aplicados en el ajuste del modelo RFM	23
3. Datos y Métodos	29
3.1. Descripción de las zonas de estudio	29
3.1.1. Valledupar	29
3.1.2. Sabana de Bogotá y Guavio	31
3.2. Materiales	33
3.2.1. Hardware	33

3.3. Datos	35
3.3.1. Fotografías aéreas	35
3.3.2. Puntos de control: control terrestre	36
3.3.3. DEM	38
3.3.4. Imágenes VHR	40
3.4. Métodos	40
3.4.1. Etapa 1 - Caracterización, procesamiento y preparación de los insumos necesarios para la ortorrectificación	41
3.4.2. Etapa 2 - Experimentos de Ororrectificación con mínimos cuadrados ordinarios (OLS)	47
3.4.3. Etapa 3 - Ororrectificación con el algoritmo evolutivo PSO y validación de los resultados	50
4. Resultados	55
4.1. Preparación y caracterización de insumos necesarios para la ortorrectificación	55
4.1.1. Caracterización DEM	55
4.1.2. Bloques Fotogramétricos	56
4.1.3. Puntos estereoscópicos extraídos de los bloques fotogramétricos	58
4.2. Evaluación de la ortorrectificación por mínimos cuadrados ordinarios	58
4.2.1. Evaluación del ajuste del modelo RFM	59
4.2.2. Validación del ajuste del modelo RFM y distintos MDT a partir del fotocontrol de validación	61
4.3. Ororrectificación obtenida a partir de PSO	69
4.3.1. Modelos RFM estimados a partir de PSO	70
4.3.2. Supuestos estadísticos de los residuales de los puntos de validación	71
4.3.3. Errores medios cuadráticos residuales y verificación del cumplimiento de la especificación técnica vigente	74
5. Discusión	76
6. Conclusiones y recomendaciones	81
6.1. Conclusiones	81
6.2. Recomendaciones	82
A. Anexo: Caracterización DEM	83
B. Anexo : Aseguramiento de la calidad bloques fotogramétricos	89
C. Anexo: Puntos estereoscópicos extraídos del bloque fotogramétrico G10	101
D. Anexo: Puntos estereoscópicos extraídos del bloque fotogramétrico G16	201

E. Anexo: Puntos estereoscópicos extraídos del bloque fotogramétrico VLL06	268
F. Anexo: Puntos estereoscópicos extraídos del bloque fotogramétrico VLL04R	327
G. Anexo: Puntos estereoscópicos extraídos del bloque fotogramétrico VLL08	389
H. Anexo: Puntos estereoscópicos extraídos del bloque fotogramétrico VLL14	453
I. Anexo: Lecturas de los puntos estereoscópicos en las imágenes VHR utilizadas	521
J. Anexo: Resultados experimentos ortorrectificación con mínimos cuadrados ordinarios en PCI Geomatica	530
K. Anexo: Resultados experimentos ortorrectificación con mínimos cuadrados ordinarios en ERDAS	536
L. Anexo: Resultados experimentos ortorrectificación con mínimos cuadrados ordinarios en ENVI	542
M. Anexo: Residuales obtenidos de las ortoimágenes generadas por el algoritmo evolutivo PSO a partir del control de validación	548
Bibliografía	551

Lista de símbolos

Glosario

Altura elipsoidal (h): Medida a lo largo de la normal elipsoidal, es la distancia entre la superficie del elipsoide y el punto de medición. La magnitud y dirección de este vector dependen del elipsoide empleado [IGAC, 1997].

Altura ortométrica (H_{ort}): Es la distancia tomada en la dirección normal al geoide entre éste y el punto de medición. La curvatura de esta altura se debe al hecho de que la línea de la plomada coincide con el vector gravedad a medida que atraviesa diferentes superficies equipotenciales, las cuales no son paralelas entre sí [IGAC, 1997].

Control terrestre: Etapa del proceso cartográfico mediante la cual se realiza el levantamiento de puntos de control terrestre [IGAC, 2016b].

Coordenada geocéntrica: Sistema de coordenadas cartesianas con origen en el centro de masas de la tierra tal que el eje X está sobre el plano ecuatorial y su orientación corresponde con el meridiano de *Greenwich*; el eje Y está sobre el plano ecuatorial y a 90° del eje X según la regla de la mano derecha y ; el eje Z coincide con el eje de rotación terrestre. Es positivo hacia el polo norte y negativo hacia el polo sur. [IGAC, 2016b].

DEM - Digital Elevation Model: Representación cuantitativa y continua de la distribución espacial de una variable de interés (temperatura, pH del suelo, etc.) pero comúnmente se caracterizan las alturas del terreno. Los DEM que describen alturas del terreno contienen información acerca de la posición horizontal y la altura de los elementos de la superficie terrestre. La denominación MDT (Modelos Digitales de Terreno) es la genérica para todos los modelos digitales, incluyendo los DEM (Modelos Digitales de Terreno) en los cuales la altura se refiere a la elevación sobre el nivel medio del mar. [IGAC, 2016b].

Efemérides: Conjunto de datos que describen la posición de un satélite como una función de tiempo. [IGAC, 2016b].

Especificación: Según la NTC 5662, corresponde a un documento en el que se describen detalladamente las características o condiciones mínimas que debe cumplir un producto

geográfico, con el fin de crearlo, proveerlo y usarlo de manera estandarizada, permitiendo la interoperabilidad entre los datos y maximizando la calidad de la información [IGAC, 2016b].

Exactitud Posicional: Describe la cercanía en posición de los objetos en el conjunto de datos, con respecto a sus posiciones verdaderas (o las asumidas como verdaderas) [IGAC, 2016b].

Faja de vuelo: Sucesión de fotografías aéreas traslapadas tomadas con el mismo rumbo [IGAC, 2016b].

Fotocontrol: Corresponde al proceso de control terrestre [IGAC, 2016b].

Kappa: Es el ángulo que representa el giro sobre el eje Z o el movimiento horizontal que presenta el avión a la hora de la toma de la fotografía [IGAC, 2018].

Línea de vuelo: Unión de los centros de proyección de las fotografías aéreas pertenecientes a una faja [IGAC, 2016b].

Mapa topográfico: Representación gráfica a escala y simplificada de la superficie terrestre, generalmente sobre una superficie plana, utilizando una proyección cartográfica [IGAC, 2016b].

Método determinístico: Se refiere a un modelo matemático donde los mismos datos de entrada producen un resultado ya conocido, es decir no existe error y ningún tipo de incertidumbre. Por lo tanto su uso asume que los datos de análisis poseen relaciones matemáticas invariantes y por consiguiente se conoce de primera mano el resultado de su aplicación. [Tsirikoglou et al., 2020].

Mínimo global: Matemáticamente se conoce como el menor valor alcanzado por la función que describe la curva en todo el espacio objetivo. Desde el enfoque de optimización se conoce como el valor que minimiza la función objetivo independientemente de sus condiciones, por lo tanto es el buscado con los métodos de esta naturaleza [Tsirikoglou et al., 2020].

Mínimo local: Matemáticamente se conoce como uno de los valores menores (valles) que posee la función que describe la curva en un intervalo abierto del espacio objetivo. Desde el enfoque de optimización se conoce como uno de los valores que minimiza la función objetivo bajo condiciones especiales, pero no es el más adecuado [Tsirikoglou et al., 2020].

Omega: Es el ángulo que representa la inclinación transversal (banqueo) que presenta el avión a la hora de la toma de la fotografía, es decir sobre el eje X [IGAC, 2018].

Ondulación geoidal (N): Distancia entre el geoide y el elipsoide medida a lo largo de

la línea real de la plomada [IGAC, 1997].

Orientación absoluta: Proceso de la aerotriangulación por el cual se realiza la identificación de los puntos de control terrestre en el modelo estereoscópico y se establece la relación geométrica entre el modelo y el terreno. [IGAC, 2016b].

Orientación interior: Es el proceso que realiza la definición de los parámetros (ubicación del punto principal y punto de autocolimación) del sistema coordinado imagen de cada una de las fotografías, siendo necesario poseer de el certificado de calibración de cada una de las cámaras métricas con las que fueron capturadas las aerofotografías [Aber et al., 2019]. Define la geometría interna de la cámara o sensor en el momento de la toma [IGAC, 2016b].

Orientación relativa: Establece las relaciones geométricas entre las imágenes que conforman un modelo estereoscópico, mediante la medida de coordenadas de un número mínimo de cinco puntos comunes de dos tomas consecutivas, en los que se verifican condiciones de colinealidad y coplaneidad. [IGAC, 2018].

Pansharpening: Corresponde al proceso de fusión de imágenes realizado a una imagen multiespectral que tiene como propósito suministrarle la mejor resolución espacial que posee la banda pancromática, a todas las bandas multiespectrales, sin perder la riqueza espectral de las demás bandas [Grochala and Kedzierski, 2017].

Phi: Es el ángulo que representa la inclinación longitudinal que presenta el avión a la hora de la toma de la fotografía, es decir sobre el eje Y [IGAC, 2018].

Punto de control: Se conoce como al objeto o parte de el, en el terreno, de fácil identificación sobre fotografías aéreas, imágenes satelitales o productos cartográficos, al cual se le determina coordenadas geográficas en un sistema de referencia adecuado. De acuerdo a la ISO TC 211, punto sobre la Tierra que tiene una posición geográfica conocida con exactitud. [IGAC, 2016b].

Sistema de Referencia: Superficie definida matemática o físicamente, o a través de una red de puntos de control existente, a la cual se refieren coordenadas horizontales, alturas o valores de potencial de gravedad [IGAC, 2016b].

Abreviaturas

Abreviatura	Término
ALOS	<i>Advanced Land Observation Satellite</i>
ASPRS	<i>American Society for Photogrammetry and Remote Sensing</i>
AW3D30	<i>ALOS Global Digital Surface Model: ALOS World 3D - 30m</i>
BKG	Oficina Federal para Cartografía y Geodesia de Alemania (sigla en inglés)
DEM	Modelo Digital de Elevación (sigla en inglés)
EA	Algoritmo Evolutivo (sigla en inglés)
ENA	Encuesta Nacional Agropecuaria
FBM	<i>Feature Based Matching</i>
FCA	<i>Feature Conditional Analysis</i>
GA	Algoritmo Genético (sigla en inglés)
GDEM	<i>Global Digital Elevation Model</i>
GNSS	<i>Global Navigation Satellite System</i>
GPS	<i>Global Positioning System</i>
GSD	<i>Ground Sample Distance</i>
ha	hectárea
HR	Imagen de alta resolución espacial (sigla en inglés)
IGAC	Instituto Geográfico Agustín Codazzi
ITRF2014	<i>International Terrestrial Reference Frame 2014</i>
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
JAXA	Agencia Japonesa de Exploración Aeroespacial (sigla en inglés)
LS	Mínimos Cuadrados (sigla en inglés)
LMS	Least Mean Square
m	metro
NGA	Agencia Nacional de Inteligencia Geoespacial de Estados Unidos (sigla en inglés)
NTC	Norma Técnica Colombiana
OGC	<i>Open Geospatial Consortium</i>
OLS	Mínimos Cuadrados Ordinarios (sigla en inglés)
PNN	Parque Nacional Natural
PNUD	Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo
PSO	<i>Particle Swarm Optimization</i>
REST	DEM de restitución fotogramétrica
RFM	<i>Rational Functional Model</i>
RPC0	<i>Rational Functional Model</i> de grado 0
RPC1	<i>Rational Functional Model</i> de grado 1
RPC2	<i>Rational Functional Model</i> de grado 2
RPC3	<i>Rational Functional Model</i> de grado 3
RSM	<i>Rigorous Sensor Model</i>

Abreviatura	Término
SIRGAS	Sistema de Referencia Geocéntrico para las Américas
SPF	<i>Simple Polynomial Fitting</i>
SRTM	<i>Shuttle Radar Topography Mission</i>
USM	<i>Universal Sensor Model</i>
VHR	Imagen de muy alta resolución espacial (sigla en inglés)
WV2	Imagen satelital WorldView-2

1. Introducción

1.1. Contexto

Con la disponibilidad y el desarrollo de programas satelitales que proveen imágenes de alta resolución espacial (o *High Resolution* HR, por sus siglas en inglés) [Maglione, 2016] la ortorrectificación se ha convertido en uno de los temas principales de investigación, tomando como eje central su aplicación en imágenes satelitales ópticas y no ópticas [Zhang et al., 2012], llegando incluso a estudiar su empleo en imágenes capturadas en regiones de otros cuerpos celestes [Geng et al., 2019]. Desde 1999 con la puesta en órbita de la misión IKONOS-2 fue el inicio de la era actual de auge y florecimiento del interés investigativo en el empleo de imágenes satelitales de muy alta resolución espacial (o *Very High Resolution* VHR, por sus siglas en inglés), o sea aquellas con resolución espacial igual o inferior a 1 m, las cuales se caracterizan por poseer la mejor resolución espacial en la banda espectral del pancromático.

El *Open Geospatial Consortium* (OGC) [Jannati and Valadan Zoej, 2015] desde el año 1999 descartó de forma oficial a los modelos físicos independientes de disposición espacial *Rigorous Sensor Model* (RSM) y adoptó al *Rational Functional Model* (RFM) [Maglione, 2016] como estándar para las imágenes satelitales de resolución espacial menor a 20 m, este es definido en la ISO 19130 [Belfiore and Parente, 2016]. Esta decisión fue originada porque la aplicación del modelo RFM es sencilla, segura y eficiente [Toutin, 2004], además de que puede ser empleada en cualquier imagen sin importar si proviene de un sensor óptico o no óptico [Belfiore and Parente, 2016, Valadan Zoej et al., 2007] independiente del sistema de referencia geográfico [Yavari et al., 2018].

El escenario deseable en el proceso de ortorrectificación de imágenes de sensores remotos es que su procesamiento sea semiautomático y que se garantice que las ortoimágenes generadas estén libres de distorsiones provocadas por la topografía, curvatura terrestre, errores fortuitos de toma, ángulo de incidencia y con poca afectación del sistema de referencia local de la región cubierta [Marsetič et al., 2015]. Además, los *Rational Polynomial Coefficients* (RPC) aportados por las empresas distribuidoras de imágenes VHR poseen una exactitud posicional que oscila entre los 5 m [Aguilar et al., 2017, Ye et al., 2017] y los 9 m [Kurczyński et al., 2018] dependiendo su valor del tipo de topografía, provocando la realización de estudios que busquen su disminución a menos del tamaño del pixel de la imagen [Shen et al., 2017].

El escenario en mención ha propiciado la investigación y aplicación de métodos de optimización en el ajuste de los modelos RFM [Alizadeh Moghaddam et al., 2018] y RSM [Wang et al., 2016], como el uso de algoritmos evolutivos [Valadan Zoej et al., 2007], junto a estudios relacionados con el tipo de puntos de control [Aguilar et al., 2017] y modelos digitales de terreno (MDT) [Reinartz et al., 2011] usados en la ortorrectificación. Con relación al uso de las ortoimágenes se ha demostrado que en regiones con características de pendiente y ángulo de incidencia alto, es dificultoso ajustar la imagen para generar cartografía a escala 1:10.000 [Kurczyński et al., 2018] o su empleo en aplicaciones detalladas [Naeini et al., 2017, Zhang et al., 2018] a pesar del uso indiscriminado de métodos de optimización de diferente naturaleza.

Entendiendo que la cartografía básica corresponde a un producto de precisión que muestra los rasgos naturales y topográficos del territorio [IGAC, 2016b], la cual es necesaria para la toma de decisiones y solución de conflictos territoriales. En Colombia, a partir de los acuerdos logrados en el proceso de paz [De la Calle et al., 2016] se originó el proyecto de catastro multipropósito [de Planeación, 2016] y con el fin de afrontar el reto de actualizar la cartografía básica en las zonas del país priorizadas fue establecido el Plan Nacional de Cartografía [IGAC, 2017]. De acuerdo con el Plan Nacional de Cartografía [IGAC, 2017], las zonas priorizadas no poseen cartografía básica a escala 1:10.000 actualizada debido a la dificultad histórica de poseer ortoimágenes de resolución espacial menor a un metro de la totalidad del país.

El mejoramiento de las metodologías existentes de ortorrectificación de imágenes VHR es una de las necesidades que posee el país, debido a que se requiere la generación de productos cartográficos [De la Calle et al., 2016] adecuados para proyectos que contemplan la actualización masiva de información geoespacial en los próximos cinco años [Gobierno de Colombia, 2019]. Por otro lado, existe la necesidad de explorar, aplicar y mejorar los métodos de optimización estadísticos y/o computacionales usados en el proceso de ortorrectificación, con el propósito de medir su eficiencia e identificar los aspectos significativos que se deben tener en cuenta en una posible implementación en procesos de producción cartográfica masiva. La investigación presentada posee como eje central la propuesta de un método para la ortorrectificación de imágenes VHR empleando algoritmos evolutivos y puntos estereoscópicos de bloques fotogramétricos de *Ground Sample Distance* (GSD) menor a 0.5 m que permitan afrontar el reto de la actualización masiva de la cartografía básica del país además de explorar el comportamiento de este tipo de métodos con los insumos que cuenta el país.

1.2. Planteamiento del problema

Las imágenes satelitales VHR son el insumo adecuado para realizar de forma detallada el monitoreo de desastres naturales [Kravchenko et al., 2014], inventarios forestales, estudios multitemporales [Zhang et al., 2018] y la generación de cartografía básica [Yépez Rincón and

Lozano García, 2019]. Las imágenes VHR se clasifican en monoscópicas y estereoscópicas diferenciándose por el tipo de captura. La toma estereoscópica captura dos imágenes en diferentes perspectivas con el fin de obtener una escena en tercera dimensión de la zona de interés [Jeong, 2017]. Mientras la toma monoscópica da como resultado una imagen a un determinado ángulo de incidencia.

Las imágenes VHR monoscópicas y estereoscópicas, al igual que todas las imágenes usadas con fines cartográficos, requieren de ortorrectificación, debido a que esta condición asegura confiabilidad en los análisis cuantitativos derivados de ellas [Poli and Toutin, 2012]. De acuerdo a Toutin [Toutin, 2004] la ortorrectificación se define como el proceso que elimina las distorsiones geométricas de las imágenes ocasionadas por la perspectiva y condiciones de la toma junto a la presencia del relieve en la zona tomada.

En comparación a las imágenes VHR estereoscópicas, las imágenes monoscópicas presentan dificultades metodológicas referentes a la ortorrectificación [Jeong, 2017]. Dentro de esos problemas se pueden mencionar la obtención de puntos de control adecuados [Aguilar et al., 2017, Alizadeh Moghaddam et al., 2018, Belfiore and Parente, 2016], la disponibilidad de *Digital Elevation Models* (DEM) apropiados [Alizadeh Naeini et al., 2019] y la aplicación de un método de optimización conveniente al ajuste del modelo seleccionado para la realización de la corrección geométrica a las imágenes [Aguilar et al., 2012a, Belfiore and Parente, 2016, Marsetič et al., 2015]. Lo anterior es evidente cuando las imágenes son utilizadas como insumo para la generación de cartografía básica de escalas grandes [Kurczyński et al., 2018].

Los inconvenientes mencionados en la ortorrectificación de imágenes VHR han generado múltiples investigaciones relacionadas con los insumos y métodos de optimización, entre las que se pueden citar: el uso de diferentes DEM [Aguilar et al., 2017, Alizadeh Naeini et al., 2019], puntos de control provenientes de ortofotomosaicos [Kartal et al., 2018], uso de información vectorial [Marsetič et al., 2015], de planchas cartográficas [Jannati and Valadan Zoej, 2015] y la estimación del modelo *Rational Functional Model* (RFM) asociado a la imagen empleando métodos de optimización estadísticos [Li et al., 2018a, Shen et al., 2017], matemáticos [Cao, 2018] y computacionales [Jannati and Valadan Zoej, 2015, Naeini et al., 2017, Valadan Zoej et al., 2007] entre otros.

De la revisión anterior se evidencia la necesidad del estudio de métodos alternativos que permitan la obtención de VHR monoscópicas ortorrectificadas que puedan ser empleadas en la generación de cartografía básica de escalas grandes [Kurczyński et al., 2018, Pérez et al., 2005, Lencinas and Díaz, 2011]. Esta investigación pretende obtener la exactitud posicional para este tipo de cartografía con el empleo de métodos computacionales orientados al uso de algoritmos evolutivos (EA) y puntos de control extraídos de bloques fotogramétricos preexistentes de GSD menores a 0.5 m, este último insumo ha sido poco estudiado en este

tipo de aplicaciones.

1.3. Aproximación conceptual

La estimación de los coeficientes del modelo RFM depende exclusivamente de los puntos de control, por lo tanto su calidad y el método de recolección son aspectos influyentes en el resultado final [Marsetič et al., 2015]. Además para su estimación se requiere conocer algún tipo de valor de altura ortométrica [Belfiore and Parente, 2016] pudiéndose obtener por métodos *Global Navigation Satellite System* (GNSS) [Aguilar et al., 2012a, Cao, 2018, Shen et al., 2017], interpolación espacial de información vectorial [Alizadeh Moghaddam et al., 2018, Moghaddam et al., 2018, Naeini et al., 2017] o extraídos del MDT utilizado en la ortorrectificación [Aguilar et al., 2017, Li et al., 2018a]. La estimación de los parámetros del modelo RFM se ha visto como un problema de optimización en la búsqueda del mejor método, clásicamente se ha empleado el método de mínimos de cuadrados ordinarios (OLS, por sus siglas en inglés), pero su aplicación ha presentado problemas por la sobreparametrización y correlación de los parámetros estimados [Alizadeh Moghaddam et al., 2018, Cao, 2018, Jannati and Valadan Zoej, 2015, Li et al., 2018a] por lo que requiere de bastantes puntos de control y la calidad de la estimación es sensible a su distribución espacial [Yavari et al., 2018].

Uno de los métodos de optimización que ha sido aplicado recientemente al proceso de ortorrectificación de las imágenes satelitales VHR son los algoritmos evolutivos (EA), debido a que logran una solución óptima de gran nivel aplicando la teoría evolutiva biológica [Li et al., 2018a] y su uso reduce significativamente el número de puntos de control necesarios [Alizadeh Moghaddam et al., 2018, Jannati and Valadan Zoej, 2015] en comparación a los resultados que ha arrojado la estimación por OLS, sin embargo la utilización de estas técnicas requiere de elevados recursos computacionales [Valadan Zoej et al., 2007]. La aplicación de los algoritmos evolutivos ha sido realizada en imágenes VHR de forma conjunta con técnicas estadísticas como la regresión simple [Li et al., 2018b], el algoritmo de eliminación inversa de Gauss-Jordan [Valadan Zoej et al., 2007] y la técnica *Figure Condition Analysis* (FCA) [Alizadeh Moghaddam et al., 2018, Topan, 2013, Topan and Kutoglu, 2009]. En todos los casos fueron reducidos el número de puntos de control necesarios a un intervalo entre cinco a quince para el ajuste de los modelos RFM de grados superiores a dos, logrando una exactitud posicional inferior al tamaño de píxel. [Alizadeh Moghaddam et al., 2018]

Los puntos estereoscópicos provenientes de bloques fotogramétricos preexistentes, sirven como insumo de puntos de control, pero aún no se ha explorado su potencial en la ortorrectificación de imágenes VHR. Esta fuente de puntos de control es significativa porque los bloques fotogramétricos se componen de imágenes estereoscópicas y su exactitud posicional depende del método con el que fueron realizadas y validadas la orientación interior, orientación rela-

tiva y orientación absoluta [Salach, 2017, Lollino et al., 2015], además de que por máximo contiene la mitad de la exactitud posicional del productor final [Heidemann et al., 2013]. Por consiguiente, la fuente anterior proporciona puntos de control más exactos y precisos además de ilimitados junto a un valor de cota ortométrica de alta exactitud, siendo significativas estas características en las zonas de condiciones topográficas complicadas y de difícil acceso para la materialización en campo de puntos de control [Aguilar et al., 2017, Gomez and Deccechis, 2008].

1.4. Preguntas de Investigación

¿Cuáles son los procesos críticos en la ortorrectificación de imágenes monoscópicas de muy alta resolución espacial con ángulos de toma de incidencia superiores a 18° para generar productos que cumplan los estándares cartográficos para la escala 1:10.000?

¿Cuáles son las especificaciones que deben cumplir los puntos de control y modelos digital de elevación para la generación de ortoimágenes que cumplan los estándares cartográficos para escala 1:10.000?

¿Cuál es la mejora de la exactitud posicional en la generación de ortoimágenes al usar algoritmos evolutivos (EA) y puntos estereoscópicos provenientes de bloques fotogramétricos preexistentes de resolución espacial menor a 0.5 m?

1.5. Objetivos

1.5.1. Objetivo General

Desarrollar un método para la ortorrectificación de imágenes satelitales monoscópicas de muy alta resolución (VHR) de ángulos de incidencia superiores a 18° utilizando algoritmos evolutivos y puntos estereoscópicos provenientes de bloques fotogramétricos preexistentes de resolución espacial menor a 0.5 m para su empleo en la generación de cartografía básica a escala 1:10.000.

1.5.2. Objetivos Específicos

1. Estimar los parámetros óptimos relacionados con las características y procesamiento previo de las imágenes satelitales de muy alta resolución, los bloques fotogramétricos, los puntos de control y los DEM necesarios para la ortorrectificación.

2. Evaluar los métodos de corrección geométrica que utilizan el modelo *Rational Functional Model* ajustado por mínimos cuadrados ordinarios (OLS) aplicándolo al ajuste de imágenes VHR a partir de puntos estereoscópicos provenientes de bloques fotogramétricos.
3. Implementar un método de corrección geométrica para imágenes VHR orientado a la utilización del algoritmo evolutivo *Particle Swarm Optimization* (PSO) y puntos estereoscópicos provenientes de bloques fotogramétricos.
4. Validar la exactitud posicional de las imágenes ortorrectificadas resultantes de la aplicación del algoritmo PSO para la generación de cartografía básica a escala 1:10.000.

1.6. Importancia de la investigación

De acuerdo al Plan Nacional de Cartografía las zonas que poseen productos cartográficos de mejor exactitud posicional corresponden a las que han sido actualizadas a partir de imágenes estereoscópicas [Barazzetti et al., 2016, IGAC, 2017]. Por lo tanto, la generación cartográfica es limitada a escalas pequeñas (1:100.000 y 1:500.000) en las regiones que poseen cubrimiento de imágenes monoscópicas [Belfiore and Parente, 2016], a pesar de ser cubiertas por imágenes satelitales recientes de resolución espacial menor a 1 metro. Por otro lado, el gobierno de Colombia a través del proyecto de catastro multipropósito estableció que el país tendrá su inventario predial actualizado de todo el territorio nacional para el año 2025 [Gobierno de Colombia, 2019]. Este nuevo proyecto obliga a que se investiguen y desarrollen métodos que puedan establecer alternativas que le suministren al país información geoespacial confiable que preferiblemente potencialice la información existente y que ofrezcan el nivel de detalle que permitan realizar los estudios en zonas rurales que requieran información cartográfica de escala 1:10.000.

2. Marco Referencial

El capítulo dos se encuentra organizado en dos tópicos: (i) el primero corresponde al marco conceptual que relaciona los conceptos y temas principales de la percepción remota, computación evolutiva, fotogrametría digital y estándares de datos geográficos, los cuales son cruciales para el buen desarrollo de la investigación presentada; (ii) presenta el estado del arte en cuestión de insumos y métodos de optimización empleados en el ajuste del modelo de ortorrectificación matemático *Rational Functional Model* (RFM) y como se evidencia el problema de investigación planteado en la introducción.

2.1. Marco Conceptual

2.1.1. Imágenes satelitales de muy alta resolución

Las imágenes satelitales que poseen resolución espacial o *Ground Sample Distance* (GSD) menor a un (1) m, son conocidas como de muy alta resolución (VHR) [Huang et al., 2016, Maglione, 2016]. El lanzamiento de la misión IKONOS-2 en el año 1999 [European Space Imaging, 2018] proporcionó las primeras imágenes de este tipo, sin embargo, su uso se generalizó desde el año 2007 y 2008 con el lanzamiento respectivo de las misiones satelitales de WorldView-1 y Geoeye-1, las cuales ahora administra la constelación *Digital Globe* [Maglione, 2016]. La toma de las imágenes satelitales VHR se realiza de dos formas: monoscópica y estereoscópica. La toma monoscópica consiste en la captura de solo una imagen a un determinado ángulo de incidencia mientras que la toma estereoscópica aplica el principio de paralaje implementado en la fotogrametría clásica [Aber et al., 2019], el cual consiste en la captura de dos imágenes del terreno en dos distintas perspectivas que asegure la obtención de toda la zona de interés en tercera dimensión [Jeong, 2017].

Este tipo de imágenes registran la mejor resolución espacial en la banda espectral del pancromático, lo cual es una práctica común en todas las misiones satelitales sin importar el tipo de imagen capturada [Grochala and Kedzierski, 2017]. Por consiguiente, el proceso de fusión de imágenes denominado *pansharpening* es necesario para aprovechar esta característica en las demás bandas espectrales [Imani, 2019], el cual ha sido plenamente estudiado en las imágenes VHR [Meng et al., 2019]. Por otro lado, la resolución espectral y resolución espacial de las imágenes VHR ha mejorado conforme se lanzan nuevas misiones [Maglione, 2016],

por ejemplo, la misión WorldView-3, lanzada en el 2014, realiza la captura en ocho bandas espectrales y permite la obtención de imágenes con resolución espacial de 0.31 m [Barazzetti et al., 2016].

Las imágenes satelitales de muy alta resolución espacial han sido usadas para diversos propósitos [Wang and Zhao, 2018] como monitoreo de desastres ambientales [Cameron et al., 2000], investigación de ataques terroristas [Zhang et al., 2018], agricultura [Firdaus et al., 2017, Tarko et al., 2015], inventarios forestales [Valbuena et al., 2008], generación de productos cartográficos [Holland et al., 2006, Jannati and Valadan Zoej, 2015, Rizeei and Pradhan, 2019, Ye et al., 2017] en zonas de condiciones topográficas y meteorológicas complicadas [Kurczyński et al., 2018, Zhang et al., 2016], entre otros propósitos [Li et al., 2018b, Nemmaoui et al., 2019, Terrail and Jurie, 2018]. No obstante, para emplear las imágenes en los propósitos mencionados anteriormente es necesario realizar el proceso de ortorrectificación [Baltsavias, 1996].

2.1.2. Ororrectificación o corrección geométrica

De acuerdo a Toutin [Toutin, 2004], la ortorrectificación o corrección geométrica se conoce como el proceso que elimina las distorsiones geométricas de las imágenes ocasionadas por las condiciones geométricas de la toma y el tipo de topografía la zona capturada [Altena and Kääh, 2017]. El propósito es generar una ortoimagen la cual posee una escala constante siendo análogo a la utilidad de un mapa topográfico [Aber et al., 2019] y por lo tanto interoperable con otros tipos de datos geoespaciales como se visualiza en la Figura **2-1**. Este proceso es realizado tanto en fotografías aéreas como en imágenes satelitales, pero en cada tipo de imagen varia el modelo de disposición espacial utilizado ya sea físico o matemático [Baltsavias, 1996].



Figura 2-1.: Resultado de la ortorrectificación de una fotografía análoga comparada con un mapa topográfico. Fuente: [Schowengerdt, 2007]

El proceso de ortorrectificación fue plenamente solucionado para la rutina fotogramétrica de las fotografías aéreas, puesto que la geometría de toma y la condición de traslape entre las imágenes, permite que exista información suficiente para solucionar las ecuaciones lineales y coplanares fotogramétricas [Aber et al., 2019] a través de la automatización de las orientaciones interior, relativa y semi-automatización de la absoluta [Gobbi et al., 2018], por lo que no se ve como un problema de investigación [Heipke, 1997]. Debido a que las imágenes satelitales utilizan otros tipos de modelos de disposición espacial, el resultado de su ortorrectificación depende de dos insumos: puntos de control y DEM visualizándose con más claridad en la figura 2-2.

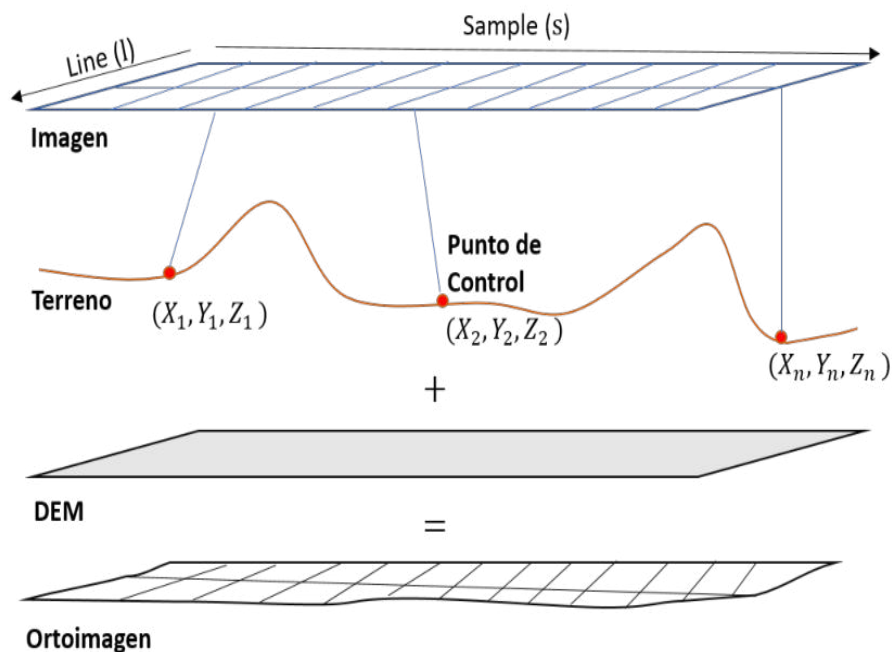


Figura 2-2.: Proceso de ortorrectificación junto a variables e insumos necesarios

Los puntos de control son necesarios para el ajuste de los modelos matemáticos [Alizadeh Naeini et al., 2019], por la dependencia funcional que poseen de información proveniente del terreno, por lo tanto uno de los objetivos de la ortorrectificación es encontrar el mejor método de optimización del ajuste del modelo respecto a las coordenadas de los puntos de control [Alizadeh Moghaddam et al., 2018]. La calidad del ajuste del modelo matemático depende directamente del tipo de fuente, número y distribución de los puntos de control [Aguilar et al., 2017], siguiendo la recomendación teórica de Fraser [Fraser et al., 2006] referente a la exactitud del punto de control no debe ser mayor al tamaño de píxel de la ortoimagen objetivo.

Los DEM son aplicados en el proceso de ortorrectificación con el propósito de corregir las distorsiones geométricas de la imagen producidas por el relieve y de las zonas que no fueron rectificadas por el modelo ajustado (sea físico o matemático) [Heipke, 1997], por consiguiente, gran parte de la calidad de la ortoimagen depende del tipo de DEM empleado [Belfiore and Parente, 2016]. Esto mismo lo indica Aber [Aber et al., 2019] quien resalta la importancia del uso del DEM incluso por encima del ajuste del modelo con los puntos de control, debido a que ningún algoritmo matemático es capaz de explicar de forma adecuada la forma de terreno y por consiguiente solo poseer el ajuste del modelo de ortorrectificación seleccionado no es suficiente.

Con relación a los modelos de ortorrectificación asociados a las imágenes satelitales existen de dos tipos: físicos o también conocidos como *Rigorous Sensor Model* (RSM) y matemáticos o empíricos. Los modelos físicos relacionan matemáticamente la toma, la topografía del área

muestreada y la posición del satélite dentro de su órbita, es decir los parámetros propios de la orientación interior y exterior de la imagen satelital [Hong et al., 2015]. No obstante, el RSM no es mayoritariamente utilizado por la poca accesibilidad a los datos de toma y su ineficiente exactitud posicional [Alizadeh Naeini et al., 2019], en contraste con los resultados de la aplicación de modelos matemáticos. Los parámetros de los modelos físicos están en función de tres variables: altitud, velocidad y postura [Alizadeh Naeini et al., 2019, Belfiore and Parente, 2016, Westin and Forsgren, 2001] que se encuentran implícitas en los datos del sensor, las efemérides y la información de la toma [Zhang et al., 2018].

2.1.3. Modelos matemáticos de ortorrectificación utilizados en imágenes satelitales

Los modelos matemáticos son considerados métodos indirectos ya que no requieren de ninguna definición de la orientación interior o exterior de la imagen [Jannati and Valadan Zoej, 2015] y por consiguiente son independientes de sus parámetros físicos, es decir es aplicable a cualquier sensor sin importar su plataforma.

De acuerdo con Belfiore [Belfiore and Parente, 2016] existen tres tipos de modelos matemáticos aplicados a imágenes provenientes de sensores remotos y que requieren para su estimación de puntos de control, estos son:

- *Simple Polynomial Fitting* (SPF): Esta conformado por funciones polinomiales ajustadas a los puntos de control. Es recomendable su aplicación en áreas pequeñas y planas [Zhang et al., 2016], sin embargo requiere de bastantes puntos de control [Naeini et al., 2017] para la eliminación de errores sistemáticos provocados por la toma de la imagen [Shen et al., 2017].
- *Universal Sensor Model* (USM): Es un modelo compuesto por los modelos RFM asociados a cada zona producto de la división de la totalidad de la imagen. Este modelo ha sido aplicado pocas veces y no se han reportado trabajos recientes sobre su empleo.
- *Rational Functional Model* (RFM): Corresponde al más utilizado en imágenes HR y VHR, por lo tanto, es el modelo aplicado en el presente documento y el cual es explicado con más detalle.

Desde el punto de vista matemático, el modelo RFM relaciona las coordenadas imagen *line* y *sample* (l, s) y del terreno (X, Y, Z) de los puntos de control (observe la figura **2-2**) con dos funciones radiales polinomiales una para la coordenada l y otra para la coordenada s [Belfiore and Parente, 2016, Hu et al., 2004], como se muestra en las ecuaciones (2-1) y (2-2):

$$l = \frac{P_1(X, Y, Z)}{P_2(X, Y, Z)}, s = \frac{P_3(X, Y, Z)}{P_4(X, Y, Z)} \quad (2-1)$$

$$P_h(X, Y, Z) = \sum_{i=0}^p \sum_{j=0}^p \sum_{k=0}^p a_{hijk} X^i Y^j Z^k \quad (2-2)$$

donde $P_h(X, Y, Z)$ es el polinomio de grado p y a_{hijk} son los coeficientes de los polinomios, siendo el objetivo del proceso de ortorrectificación su estimación a partir de los puntos de control, también son conocidos como *Rational Polynomial Coefficients* (RPC).

A partir de las ecuaciones (2-1) y (2-2) se observa que el modelo RFM puede realizarse en distintos grados, por lo anterior el grado cero (RPC0) se refiere a la transformación *shift*, el grado uno (RPC1) a la transformación afín, mientras que el grado dos es una forma cuadrática que posee doce coeficientes (RPC2) [Aguilar et al., 2012a, Shen et al., 2017] para cada uno de los polinomios de la ecuación 2-1 y en pocos estudios, debido a la complejidad de su solución, ha sido empleado el modelo de grados superiores como el de orden tres (RPC3). Los modelos de grados superiores son complejos de ajustar por su número elevado de coeficientes, por ejemplo el modelo RPC3 posee veinte coeficientes [Cao, 2018, Jannati and Valadan Zoej, 2015] por cada uno de los polinomios, es decir que en total se deben estimar 80 RPC. A medida que sea más alto el grado se requiere más puntos de control para la solución del modelo, además los grados mayores a tres son inestables en el espacio imagen [Shen et al., 2017].

2.1.4. Algoritmos evolutivos

Los algoritmos evolutivos (EA por sus siglas en inglés) son parte de los métodos que ofrece la computación evolutiva, la cual es un área importante de la inteligencia artificial, particularmente se basan en las teoría evolutiva biológica de Darwin [Whitley, 1994]. El uso de EA está orientado en la solución de problemas de optimización complejos, los cuales no arrojan soluciones adecuadas con el uso de métodos determinísticos, es decir corresponden a mínimos locales [Cámara, 2015], no obstante la principal desventaja de los EA es su requerimiento excesivo de recursos computacionales [Alizadeh Moghaddam et al., 2018]. Este tipo de algoritmos aplica la teoría de la selección natural [Venkateswarlu and Jujjavarapu, 2020] a las soluciones candidatas puesto que la asemeja como una población biológica que es expuesta a un ambiente objetivo y por su misma interacción sobreviven las más aptas a la siguiente generación o iteración [Valadan Zoej et al., 2007].

Dentro de los problemas resueltos por este tipo de métodos es necesario definir la función objetivo o *fitness* [Valadan Zoej et al., 2007], la cual realiza la evaluación de las soluciones en su minimización y selecciona las más adecuadas o aptas, es decir es el ambiente desde la perspectiva biológica. Los algoritmos evolutivos aplicados a la solución del modelo RFM son los algoritmos genéticos (GA) [Valadan Zoej et al., 2007] y *Particle Swarm Optimization* (PSO) [Li et al., 2018b, Cyriac and Rastogi, 2013, Yavari et al., 2013, Alizadeh Moghaddam et al., 2018, Topan, 2013, Topan and Kutoglu, 2009, Jannati and Valadan Zoej, 2015]. Los

GA son los métodos más populares y principalmente más estudiados [Câmara, 2015], estos algoritmos en cada iteración o generación seleccionan las soluciones más aptas producto de la aplicación de algún operador evolutivo (*reproduction, crossover, y mutation*) [Whitley, 1994] y evaluación en la minimización de la función *fitness* para su consideración en la siguiente generación o iteración [Konugurthi et al., 2016]. No obstante, el uso de GA presenta inconvenientes relacionados con el uso de los recursos computacionales y por consiguiente requiere de más tiempo para obtener un mínimo global [Valadan Zoej et al., 2007, Topan, 2013], siendo superado en este aspecto por el algoritmo PSO [Alizadeh Moghaddam et al., 2018, Naeini et al., 2019] el cual se visualiza su principio en la figura 2-3.

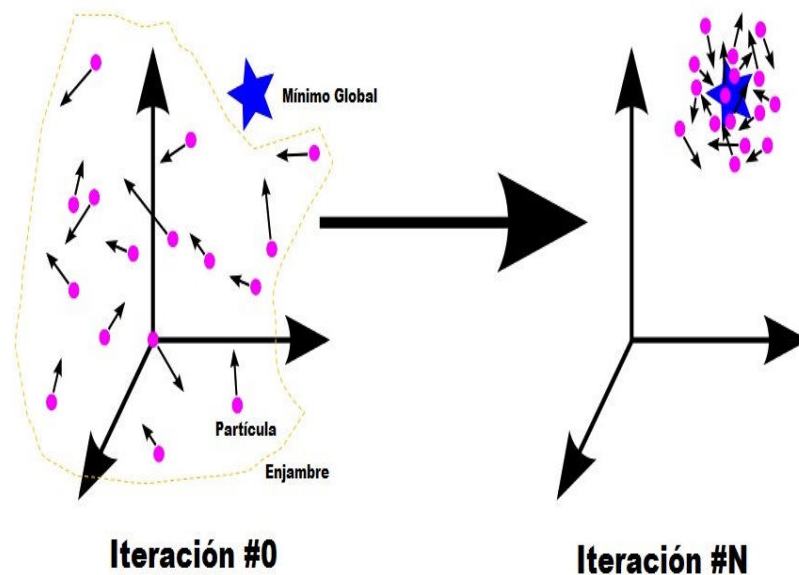


Figura 2-3.: Algoritmo evolutivo *Particle Swarm Optimization* (PSO). Fuente: Adaptado de [Clark, 2017]

Debido a que en este documento es aplicado el algoritmo PSO, este es explicado con más detalle. El PSO fue propuesto por Kennedy y Eberhart [Kennedy et al., 1995] en 1995 surgiendo de la simulación del comportamiento social de una población de aves o proveniente del entrenamiento de peces. El PSO supone que cualquiera de las dos poblaciones o *Swarm* con algún grado de libertad y aleatoriedad para cada uno de sus individuos o partículas esta en la búsqueda de depósitos de comida [Cyriac and Rastogi, 2013] con una velocidad constante. Dependiendo de la ubicación de la fuente alimenticia y facilidad de acceso esta será encontrada por alguna partícula, puesto que existen relaciones sociales dentro de la población [Yavari et al., 2013], ella informará a sus vecinos y ellos les tomará menor tiempo encontrarla, debido a que incrementan la velocidad para su búsqueda, siendo finalizado este

proceso hasta que todas las partículas minimicen en proporciones parecidas a la función *fitness* [Venkateswarlu and Jujjavarapu, 2020]. La figura 2-4 describe los procesos que realiza el algoritmo PSO, explicados previamente.

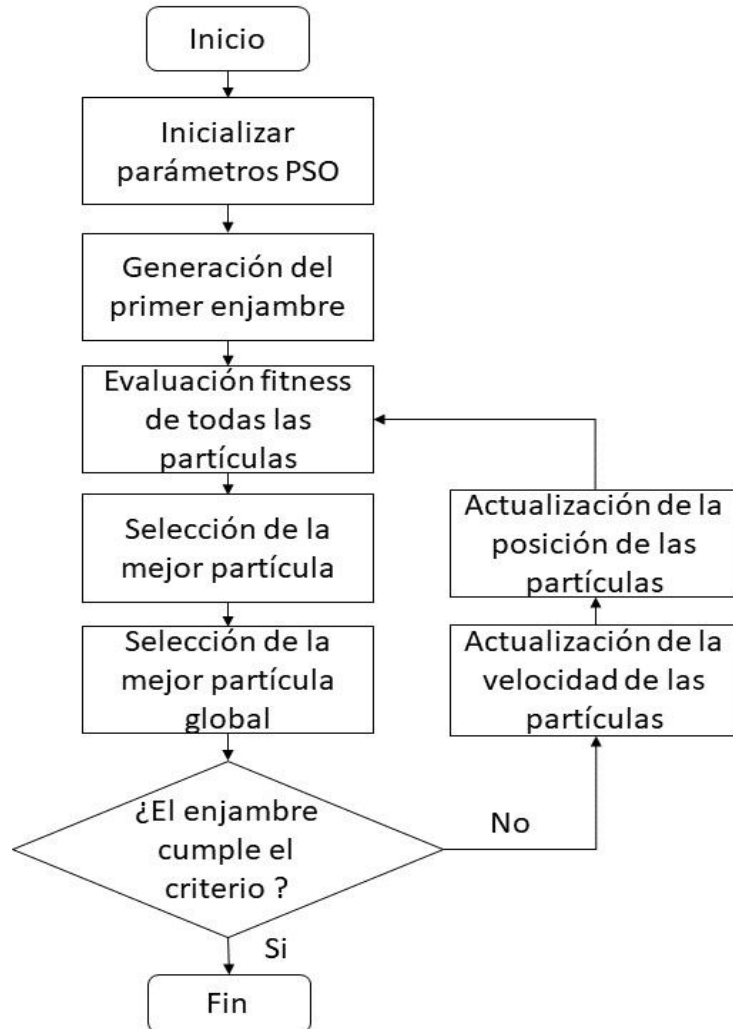


Figura 2-4.: Flujograma del algoritmo PSO. Fuente: [Venkateswarlu and Jujjavarapu, 2020].

Las ecuaciones que describen el algoritmo son las siguientes [Venkateswarlu and Jujjavarapu, 2020]:

$$X_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{iD}) \quad (2-3)$$

$$V_i = (v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{iD}) \quad (2-4)$$

$$P_{besti} = (p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{iD}) \quad (2-5)$$

$$P_{gbest} = (p_{g1}, p_{g2}, \dots, p_{gD}) \quad (2-6)$$

$$V_{id}^{k+1} = wv_{id}^k + c_1r_1^k(p_{besti}^k - x_{id}^k) + c_2r_2^k(p_{gbest}^k - x_{id}^k) \quad (2-7)$$

$$x_{id}^{k+1} = x_{id}^k + V_{id}^{k+1} \quad (2-8)$$

El vector X_i de la ecuación 2-3 representa a las posiciones de cada partícula dentro del espacio de búsqueda, el vector V_i de la ecuación 2-4 representa a la velocidad de movimiento de cada una de ellas, el vector P_{besti} de la ecuación 2-5 representa la mejor posición en el tiempo previo mientras que el vector P_{gbest} de la ecuación 2-6 representa la mejor posición en todos los tiempos para cada partícula. Las ecuaciones 2-7 y 2-8 señalan la determinación en el tiempo $k + 1$ de la velocidad y la posición respectivamente a partir del tiempo k , donde las constantes c_1 y c_2 son no negativas denominadas factores de aprendizaje (*learning factors*), mientras que los números aleatorios r_1 y r_2 son generados de una distribución uniforme $[0,1]$ y w es un factor ponderador inercial [Venkateswarlu and Jujjavarapu, 2020].

El empleo del algoritmo PSO en la ortorrectificación ha sido aplicado a la optimización del modelo RFM. En el presente proyecto de investigación fueron tomadas las consideraciones que Alizadeh et. al. [Alizadeh Moghaddam et al., 2018], Yavari et. al [Yavari et al., 2013] y Li et. al. [Li et al., 2018a] establecieron, ya que ellos de forma conjunta indicaron que el grado del modelo RFM que a optimizar corresponde a dos, es decir el modelo RPC2. Por lo anterior a partir de la ecuación 2-2 establecieron que los polinomios poseen la siguiente forma (ecuación 2-9):

$$P_h(X, Y, Z) = a_{h,0} + a_{h,1}X + a_{h,2}Y + a_{h,3}Z + a_{h,4}XY + a_{h,5}XZ + a_{h,6}YZ + a_{h,7}X^2 + a_{h,8}Y^2 + a_{h,9}Z^2 + a_{h,10}XYZ \quad (2-9)$$

Otra consideración es asegurar que las ecuaciones 2-1 y 2-9 posean solución, por consiguiente se establece que los denominadores de las coordenadas *line* y *sample* deben ser iguales y por lo tanto también las constantes $a_{2,0}$ y $a_{4,0}$ son iguales a 1, es decir:

$$P_2(X, Y, Z) = P_4(X, Y, Z) \quad (2-10)$$

Lo anterior en las investigaciones mencionadas redujo el número de coeficientes o RPC de 44 a 32 solamente, esto con el propósito de disminuir el espacio de búsqueda y provocar que el algoritmo converja utilizando menos recursos computacionales a un mínimo global, es decir a la solución más óptima [Yavari et al., 2013]. El enfoque del algoritmo PSO es la interacción de partículas, por lo que en la ortorrectificación cada una corresponde a un modelo RFM, es decir un conjunto de los 32 RPC objetivo y su participación dentro

del modelo se manifiesta de forma dicotómica, en donde 1 indica la participación del coeficiente y 0 lo contrario [Alizadeh Moghaddam et al., 2018] (figura 2-5). Por causa del arreglo anterior, cada partícula tiene un indicador asociado a la estimación por mínimos cuadrados (LS) que corresponde a la evaluación de la función *fitness* establecida para el algoritmo.

Mientras que la función *fitness* se ha definido a partir de los puntos de control de validación [Li et al., 2018a] o puntos extraídos del DEM utilizado en la ortorrectificación [Alizadeh Moghaddam et al., 2018]. Los factores de aprendizaje y el factor ponderador inercial del algoritmo PSO (ecuación 2-7) han sido determinados de forma empírica a partir de los resultados de los experimentos realizados [Li et al., 2018a].

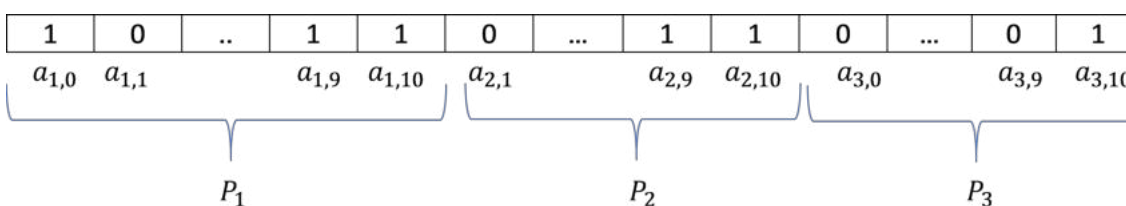


Figura 2-5.: Partícula del modelo RFM para el algoritmo PSO. Fuente: [Alizadeh Moghaddam et al., 2018]

2.1.5. Bloque fotogramétrico

El principal objetivo de la fotogrametría clásica es la reconstrucción del terreno en los ejes coordenados (X, Y, Z) de una zona geográfica que generalmente se encuentra cubierta por más de dos fotografías aéreas [Aber et al., 2019], con el propósito de generar productos cartográficos como ortofotomosaicos [Schowengerdt, 2007], DEM [Valbuena et al., 2008] y cartografía básica [IGAC, 2016b] a partir de captura estereoscópica. Por lo anterior son necesarios los bloques fotogramétricos, los cuales se pueden definir como la unión de varios modelos estereoscópicos o la orientación absoluta simultánea de múltiples fotografías que lo componen [Fraser et al., 2006] a partir de mínimo tres puntos de control.

Dentro del bloque fotogramétrico existen los puntos de paso o *tie*, los cuales son elementos identificables en más de una fotografía que se desconocen sus coordenadas de terreno y que cumplen la función de conectar las imágenes en las que se identifican [Geng et al., 2019]. Este proceso es conocido como orientación relativa y tiene el propósito de asegurar que exista consistencia entre los modelos estereoscópicos del bloque fotogramétrico [Aber et al., 2019]. Existen algoritmos de correlación de imágenes que realizan la detección semiautomática y

automática de los puntos *tie* [Salach, 2017], aunque estos también se pueden determinar de forma manual [Aber et al., 2019].

Para lograr la orientación absoluta de todas las fotografías es necesario realizar la aerotriangulación, que se define como la densificación de los puntos de control del bloque fotogramétrico [IGAC, 2016b], gracias a la solución de las ecuaciones fotogramétricas clásicas de colinealidad y coplanariedad [Marek et al., 2015] a partir de información de terreno que corresponde a los puntos de control como se ilustra en la figura 2-6. La aerotriangulación logra como resultado la determinación matemática de las coordenadas de terreno de los puntos *tie* junto a las coordenadas y los ángulos de movimiento del centro de proyección de cada una de las fotografías que componen al bloque fotogramétrico [Aber et al., 2019]. La calidad de las mediciones estereoscópicas que se realicen dentro del bloque fotogramétrico dependerá del tipo de puntos de control y de la calidad de la recolección de los puntos *tie* [Aber et al., 2019].

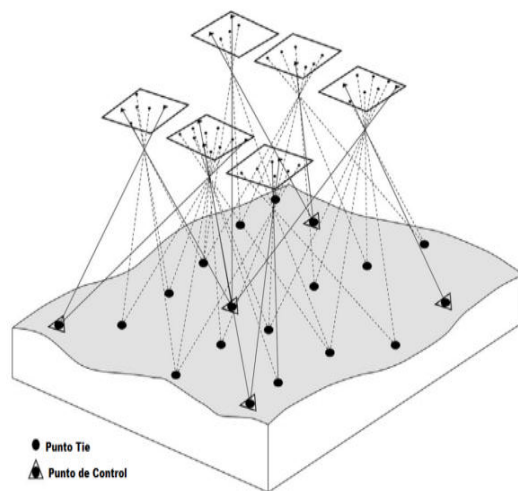


Figura 2-6.: Aerotriangulación de un bloque fotogramétrico. Fuente: [Aber et al., 2019]

Los puntos de control aplicados a los experimentos de ortorrectificación de este documento provienen de bloques fotogramétricos de fotografías aéreas, debido a que su construcción y ajuste corresponde a un proceso exhaustivo y de evaluación continua como es explicado en este apartado [Aber et al., 2019]. Lo anterior asegura que los puntos de control sean más exactos si son comparados con otras fuentes que han sido utilizadas y que corresponden a productos cartográficos finales como ortofotomosaicos [Zhang et al., 2016] o cartografía vectorial [Jannati and Valadan Zoej, 2015]. La principal ventaja de este tipo puntos de control es poseer un valor de altura ortométrica más exacto en comparación con el disponible en cualquier tipo de DEM.

2.1.6. Evaluación de la exactitud posicional de productos cartográficos.

Entendiéndose a la exactitud posicional geográfica como el grado de cercanía de un dato geoespacial a su posición verdadera en un sistema de referencia [Ariza-López et al., 2018]. La determinación de indicadores de exactitud posicional a cierto nivel de confianza estadístico (por lo general del 95 %) ha sido unos de los temas más investigados y regulados [Ariza-López et al., 2018, Heidemann et al., 2013, IGAC, 2016b] puesto que este tipo de métricas tienen el propósito de rechazar o aceptar al producto cartográfico (ortoimagen, DEM, cartografía vectorial) evaluado. Debido a que el uso del indicador seleccionado debe minimizar la probabilidad de cometer alguno de los dos tipos de errores relacionados con el control de calidad del producto analizado, entiéndase al error tipo I como el cometido al rechazar un producto conforme y al error tipo II que se refiere a la aceptación de un producto que no es conforme para el uso destinado [Ariza-López et al., 2018].

El estándar *National Standard for Spatial Data Accuracy* (NSSDA) surge de la necesidad expuesta [Ariza-López et al., 2018] al estimar la exactitud posicional en el nivel de confianza del 95 %, por lo anterior es la base del estándar establecido por la *American Society for Photogrammetry and Remote Sensing* (ASPRS) [Heidemann et al., 2013] el cual promueve la verificación de la estimación en los límites establecidos por un nivel de confianza del 95 % puesto que plantea los umbrales de aceptación. Los estándares mencionados son la base conceptual de la normatividad internacional y nacional de calidad de datos geográficos. Puntualmente, en el contexto internacional se encuentra la ISO 19157:2013 de información geográfica - calidad de datos [ISO 19157:2013, 2013] mientras que en el nacional las Normas Técnicas Colombianas (NTC): NTC 5662:2010 [NTC 5662:2010, 2010], NTC 5043:2010 [NTC 5043:2010, 2010] y NTC 5660:2010 [NTC 5660:2010, 2010]. Las normas mencionadas son el soporte técnico de las especificaciones técnicas del IGAC [IGAC, 2016b, IGAC, 2020] en el caso colombiano. Por lo anterior, se caracteriza con mayor nivel de detalle lo establecido en los estándares NSSDA y ASPRS, ya que los dos utilizan como indicadores de exactitud posicional al error medio cuadrático radial ($RMSE_r$, ecuación 2-11) y vertical ($RMSE_z$, ecuación 2-12):

$$RMSE_r = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_{terreno,i} - X_{producto,i})^2 + (Y_{terreno,i} - Y_{producto,i})^2}{n}} \quad (2-11)$$

$$RMSE_z = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Z_{terreno,i} - Z_{producto,i})^2}{n}} \quad (2-12)$$

Para aplicar el estándar NSSDA, se deben observar los elementos que relacionan las ecuaciones 2-11 y 2-12 debido a que se encuentran coordenadas del producto y también del terreno. Las coordenadas del terreno están asociadas a un producto de mejores características que posee

como requisito que su exactitud posicional debe ser por lo menos tres veces mejor que la del producto buscado [Heidemann et al., 2013], es decir, si la exactitud del producto cartográfico objetivo debe ser menor a 3 m, por lo menos la exactitud del producto tomado como verdad de terreno debe ser menor a 1 m.

Otro aspecto que considera el estándar NSSDA y con más rigurosidad en el estándar de la ASPRS para aceptar que la exactitud posicional se encuentra a un nivel de confianza estadístico del 95 %, esta directamente relacionado con el comportamiento estadístico asumido en los residuales para cada uno de los componentes (x , y y z) analizados provenientes de las ecuaciones 2-11 y 2-12. Debido a que los residuales deben seguir una distribución normal (univariada o bivariada, depende del caso) y ser homogéneos e independientes en cada uno de sus componentes [Heidemann et al., 2013, Ariza-López et al., 2018], ya que según los estándar NSSDA estas condiciones permiten estimar los intervalos de confianza de la exactitud posicional del producto evaluado a un nivel de confianza estadístico del 95 %. Por lo anterior se establecen las siguientes ecuaciones del estándar NSSDA para estimar los intervalos de confianza horizontal (ecuaciones 2-13 y 2-14) y vertical (ecuación 2-15):

Si $RMSE_x = RMSE_y$:

$$NSSDA_h = 2,447 \frac{RMSE_r}{\sqrt{2}} \quad (2-13)$$

Si $RMSE_x \neq RMSE_y$ y $0,6 < \frac{RMSE_{min}}{RMSE_{max}} < 1$:

$$NSSDA_h = 2,447 \frac{RMSE_x + RMSE_y}{2} \quad (2-14)$$

$$NSSDA_z = 1,96RMSE_z \quad (2-15)$$

2.2. Estado de arte

2.2.1. Tipo de insumos empleados en el proceso de ortorrectificación

Uno de los principales inconvenientes en el proceso de ortorrectificación de imágenes satelitales es la adquisición de puntos de control adecuados de la zona de interés [Aguilar et al., 2017], puesto que existen zonas de condiciones topográficas complicadas de difícil acceso para su captura en terreno, además por la alta probabilidad de que en su materialización en campo se presenten problemas de rastreo de señales GNSS [Aguilar et al., 2017, Gomez and Deccechis, 2008, Pérez et al., 2005] y por consiguiente baja probabilidad de obtener información idónea

para utilizar en el proceso.

La calidad de las ortoimágenes producto del proceso de ortorrectificación a partir del modelo RFM esta en función de dos factores: el tipo de puntos de control empleados [Aguilar et al., 2017, Alizadeh Naeini et al., 2019, Kravchenko et al., 2014, Toutin, 2004] y de la calidad del DEM utilizado [Gomez and Deccechis, 2008]. Por lo anterior, para el proceso de ortorrectificación se precisaron las siguientes fuentes de puntos de control y/o chequeos, referenciando los correspondientes estudios que emplearon cada una de ellas, acompañado de un gráfico de torta que precisa su distribución correspondiente a la figura 2-7.

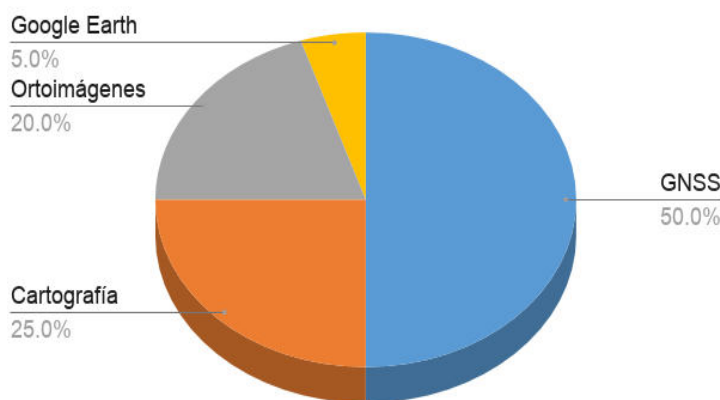


Figura 2-7.: Fuente de puntos de control utilizados en las investigaciones utilizadas

- Producto de técnicas GNSS [Aguilar et al., 2007, Aguilar et al., 2012a, Barazzetti et al., 2016, Cao, 2018, Gomez and Deccechis, 2008, Hong et al., 2015, Jeong, 2017, Kurczyński et al., 2018, Mediavilla et al., 2004, Moghaddam et al., 2018, Shen et al., 2017, Topan and Kutoglu, 2009, Topan, 2013, Yavari et al., 2013, Ye et al., 2017, Cuarteto and Felicísimo, 2003]
- Cartografía urbana [Alizadeh Moghaddam et al., 2018, Jannati and Valadan Zoej, 2015, Moghaddam et al., 2018, Naeini et al., 2017, Valadan Zoej et al., 2007].
- Información vectorial tipo línea [Li et al., 2018b].
- Ortofotomosaicos [Belfiore and Parente, 2016, Zhang et al., 2016, Zhang et al., 2018]
- Servicios WMS [Kartal et al., 2018].
- Google Earth [Aguilar et al., 2017].

En todas las investigaciones se indica la fuente, pero no se menciona su exactitud posicional entendiéndose que solamente para los productos cartográficos se encuentra de acuerdo con el estándar [Heidemann et al., 2013]. Otro aspecto fue el uso de fuentes de menor exactitud posicional que la ortoimagen objetivo, siendo el caso de los puntos extraídos de información vectorial tipo línea, servicios WMS y Google Earth. Esto va en contravía de las recomendaciones referentes a las fuentes de puntos de control las que señalan deben ser extraídos de fuentes de mayor calidad (no igual) y si es un insumo raster (ortofotomosaico) que este posea mejor resolución espacial que la ortoimagen objetivo. [Belfiore and Parente, 2016, Kartal et al., 2018].

La mayoría de los estudios de ortorrectificación referenciados realizaron la identificación de los puntos de control de forma manual. Lo anterior provoca que no existan criterios de fotoidentificación estándar [Kravchenko et al., 2014] junto a la gran cantidad de tiempo que demanda la actividad [Zhang et al., 2018]. Todos estos factores afectan globalmente los rendimientos del proceso de ortorrectificación y por otro lado la calidad del producto final.

Tratando de dar solución a los problemas anteriormente mencionados, se han buscado métodos para la detección y lectura automática de puntos de control utilizando información base vector y raster. Para el ajuste del modelo RFM, Yavari [Yavari et al., 2018] empleó información vectorial como fuente de puntos de control, específicamente puntos, líneas y polígonos, para la identificación de los puntos homólogos en la imagen satelital HR usando una red neuronal [Kravchenko et al., 2014]. Con el mismo objetivo Marsetič [Marsetič et al., 2015] acondicionó y empleó el método desarrollado por *Centre of Excellence Space-SI*, que consiste en la identificación automática de los puntos de control a partir de vectores lineales, obteniéndose métricas de exactitud posicional cercanas al píxel con el ajuste de solo 20 puntos de control. El uso de estos métodos para la búsqueda de puntos de control con información vector han sido adecuados para imágenes de alta resolución espacial (HR), sin embargo, requieren de un gran costo computacional y aún no se ha estudiado su uso en la ortorrectificación de imágenes VHR.

Siguiendo en la línea de utilizar fuentes de puntos de control tipo raster, Kartal [Kartal et al., 2018] empleó el método de correlación de imágenes de SIFT aplicado a ortofotomosaicos de escala urbana, su implementación arrojó como resultado RMSE inferiores al tamaño de píxel para imágenes de ángulos de incidencia menores a 18° , este resultado fue independiente del tipo de terreno, siendo congruentes con las experiencias de Bian [Bian et al., 2017] y Konugurthi [Konugurthi et al., 2016]. Por otro lado, Reinartz [Reinartz et al., 2011] utilizó imágenes TERRASAR-X como fuente de puntos de control, donde obtuvo resultados aceptables en zonas que no se requiere información cartográfica de alta precisión, pero en regiones de pendiente alta hubo desplazamientos e información inconsistente debido al DEM empleado. En contraste a las fuentes de información vector para los puntos de control, las técnicas que realizan la búsqueda por métodos de correlación de imágenes posee mejores resultados en las

imágenes VHR, no obstante el principal inconveniente de su uso recae en la temporalidad y la calidad de la ortorrectificación de la imagen base.

El otro aspecto señalado es el tipo de DEM aplicado en la ortorrectificación, por lo anterior se preciso esta característica de veinticuatro de las investigaciones consultadas, para ello se realiza un gráfico de torta (figura 2-8) que muestra la frecuencia en la que fue utilizado y también se señala por cada uno los estudios que los utilizaron.

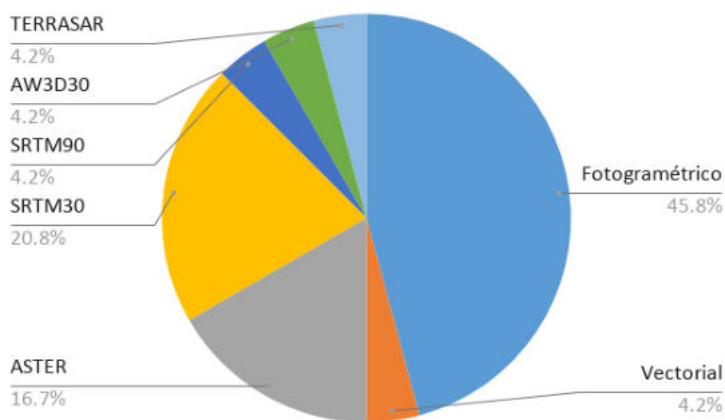


Figura 2-8.: DEM utilizados en las investigaciones utilizadas

- Procesos fotogramétricos [Aguilar et al., 2007, Aguilar et al., 2012a, Alizadeh Naeini et al., 2019, Barazzetti et al., 2016, Belfiore and Parente, 2016, Guérin, 2017, Hong et al., 2015, Jannati and Valadan Zoej, 2015, Jeong, 2017, Kurczyński et al., 2018, Shen et al., 2017, Topan, 2013, Topan and Kutoglu, 2009, Ye et al., 2017, Cuarteto and Felicísimo, 2003, Aguilar et al., 2012b]
- Producto de la digitalización e interpolación de curvas de nivel de la base cartográfica urbana [Alizadeh Naeini et al., 2019, Pérez et al., 2005].
- Proveniente del procesamiento de imágenes ASTER [Alizadeh Naeini et al., 2019, Alizadeh Moghaddam et al., 2018, Kartal et al., 2018, Lencinas and Díaz, 2011].
- *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM) de 30 m [Alizadeh Naeini et al., 2019, Bian et al., 2017, Gomez and Deccechis, 2008, Guérin, 2017, Kravchenko et al., 2014, Lencinas and Díaz, 2011, Reinartz et al., 2011, Zhang et al., 2016, Widyaningrum et al., 2016].
- SRTM de 90m [Gomez and Deccechis, 2008].
- *ALOS Global Digital Surface Model* (AW3D30) [Alizadeh Naeini et al., 2019].
- *Terra SAR-X* de 9 m [Widyaningrum et al., 2016].

Cerca del 45 % de los trabajos consultados usaron un modelo fotogramétrico (también conocido como DEM de alta precisión), sin embargo pocas zonas del mundo poseen un producto cartográfico de esta naturaleza, puesto que son costosos por el alto recurso humano, computacional y económico que se requiere para su realización, lo que provoca la complejidad de poseer insumos de alta calidad de zonas de especiales características [Gomez and Deccechis, 2008]. Debido a lo anterior, Alizade [Alizadeh Naeini et al., 2019] estudió el uso de la información de varios DEM de cubrimiento mundial (GDEM) para la generación de un DEM más preciso a partir de una escena satelital VHR, sin embargo el resultado no fue adecuado en la ortorrectificación obtenida en especial en las zonas de alta pendiente.

En cuanto a la relación del DEM y el ajuste del modelo RFM, es importante considerar que por las condiciones del modelo RFM, la calidad de la ortoimagen en zonas no cubiertas por los puntos de control depende absolutamente del DEM aplicado [Aguilar et al., 2012a, Altena and Käab, 2017, Zhang et al., 2016, Topan, 2013] provocando que un método novedoso y eficiente de optimización sea opacado por la naturaleza del DEM empleado [Kartal et al., 2018, Lencinas and Díaz, 2011, Ressler and Pfeifer, 2018]. Lo anterior provocó que Zhang [Zhang et al., 2016], corrigiera las inconsistencias de la imagen aplicando el método de interpolación *Spline*, sin embargo, su utilidad no es adecuada debido a que no realizó un análisis estadístico exhaustivo de los resultados que obtuvo. Además la precisión del ajuste del modelo RFM puede ser afectada si se utiliza la cota del DEM y se desconoce su exactitud vertical [Belfiore and Parente, 2016, Toutin, 2004].

2.2.2. Métodos de optimización aplicados en el ajuste del modelo RFM

En la tabla **2-1** se especifican los principales métodos que se han aplicado en el ajuste del modelo RFM, relacionado con su grado óptimo reportado para el método junto al número de puntos de control que logro dicha solución.

Tabla 2-1.: Principales Métodos de optimización aplicados al modelo RFM

Método	Modelo RFM	Puntos de control óptimos	Fuente
Mínimos Cuadrados Ordinarios	RPC0, RPC3	15-25	[Aguilar et al., 2006, Aguilar et al., 2017, Aguilar et al., 2012b, Aguilar et al., 2012a, Barazzetti et al., 2016, Naeini et al., 2019]
Compensación por sesgo con polinomios locales	RPC0, RPC1	15	[Shen et al., 2017]
Descomposición singular de valores mediante la normalización y regulación por el método de Tikhonov	RPC2	11, 49, 188	[Cao, 2018, Naeini et al., 2019]
Regresión con <i>stepwise</i>	RPC3	30	[Li et al., 2018b]
<i>Particle Swarm Optimization</i>	RPC2, RPC3	4, 5, 10, 15, 20, 30	[Li et al., 2018b, Yavari et al., 2013, Moghaddam et al., 2018, Alizadeh Moghaddam et al., 2018]
Algoritmos genéticos	RPC3, RPC4	4, 5, 8, 10, 15, 20, 30	[Li et al., 2018b, Yavari et al., 2013, Valadan Zoej et al., 2007, Jan-nati and Valadan Zoej, 2015]
Selección estadística USS-RFM	RPC3	5,10,15,40	[Moghaddam et al., 2018, Naeini et al., 2019]
LIR	RPC3	5,10,15,40	[Moghaddam et al., 2018, Naeini et al., 2019]
PCA	RPC3	40	[Naeini et al., 2019]

Se han realizado experimentos controlados que tuvieron el objetivo de comparar los resultados de los modelos RFM a partir del ajuste por mínimos cuadrados ordinarios (OLS), demostrando que el modelo RPC0 posee mejores resultados para zonas planas y ajuste de escenas satelitales [Aguilar et al., 2006, Aguilar et al., 2012a, Barazzetti et al., 2016, Aguilar et al., 2012b], mientras que con el proceso de automatización implementado por Zhang [Zhang et al., 2018] los mejores indicadores de exactitud posicional los obtuvo el ajuste realizado por el

modelo RPC3. Con el mismo objetivo Shen [Shen et al., 2017] realizó una compensación por sesgo con polinomios locales para un ajuste de una escena satelital, en el que se encontró que se alcanza una buena solución a los modelos RPC0 y RPC1 [Aguilar et al., 2007] con tan solo quince puntos de control con distribución regular en una área rural ondulada inferior a 100.000 ha.

Los RPC iniciales son calculados por correcciones atmosféricas y del pos proceso GNSS/INS de la toma [Kartal et al., 2018] es decir a partir del modelo físico, el proceso anterior es conocido como una transformación inversa, sin embargo, poseen errores asociados a las aberraciones de la órbita y al tipo de terreno [Hong et al., 2015], estas inconsistencias fortuitas son corregidas por los parámetros de la altitud y las efemérides en el modelo RSM mientras que en el modelo RFM son removidas con aplicación de puntos de control [Shen et al., 2017] con distribución regular. Con el objetivo de emplear una transformación inversa para la automatización del proceso de ortorrectificación, Zhang [Zhang et al., 2018] desarrolló un hardware que empleó el método *Field-Programmable Gate Array* (FPGA) que consiste en obtener RPC más precisos de las imágenes a partir del modelo RSM del sensor. Para su optimización fueron realizadas múltiples tareas en paralelo [Im et al., 2019], alcanzando RMSE radiales menores a la mitad del tamaño de píxel, y redujo el tiempo del proceso en 11000 veces respecto a los tiempos convencionales.

Debido a que la estimación de los parámetros del modelo RFM depende únicamente de los puntos de control, es decir de su calidad y de cómo estos son recolectados [Marsetič et al., 2015], distintas investigaciones han demostrado que para zonas homogéneas topográficamente y de áreas pequeñas es efectivo el modelo RFM. Además para su estimación se requiere un valor de altura ortométrica [Belfiore and Parente, 2016] ya sea este obtenido por técnicas GNSS o extraídos del DEM empleado en la ortorrectificación.

El ajuste y estimación de los parámetros (coeficientes RPC) del modelo RFM se ha visto como un problema de optimización, clásicamente se ha empleado el método de mínimos de cuadrados ordinarios (OLS), pero su aplicación ha presentado problemas por la sobreparametrización y correlación de los coeficientes [Alizadeh Naeini et al., 2019, Cao, 2018, Jannati and Valadan Zoej, 2015, Li et al., 2018b], por lo que requiere de bastantes puntos de control y la calidad de la estimación es sensible a si la distribución de los puntos es regular o irregular [Yavari et al., 2018]. Debido a que el modelo RFM está compuesto de funciones racionales (ecuación 2-1) posee problemas en los casos que el denominador tiende a cero y presenta bastantes desplazamientos en las zonas no cubiertas por los puntos de control [Zhang et al., 2016].

En la misma línea Moghaddam y su equipo [Moghaddam et al., 2018] evaluaron y propusieron un método de selección estadística de los RPC en comparación con los métodos l_1 -norm regularization (L1R) y PSO, la selección surge de dos fases correspondiente a un análisis

de correlación estadístico y la aplicación de un test de significancia estadística a partir del ajuste de los RPC con los puntos de control, los resultados arrojaron imágenes con exactitud inferior al píxel con el uso de cerca de 10 y 15 puntos de control. Valadan Zoej y su equipo [Valadan Zoej et al., 2007] utilizaron la aplicación de (GA) junto al algoritmo de eliminación inversa de Gauss-Jordan demostrando que los modelos RFM de tercer y cuarto grado poseen mejores resultados con tan solo cinco y diez puntos de control, pero requiere de bastantes recursos computacionales [Valadan Zoej et al., 2007].

En la búsqueda de métodos de optimización, Cao [Cao, 2018] propuso realizar la estimación por un método estadístico que consistió en la descomposición singular de valores mediante la normalización y regulación por el método de Tikhonov arrojando como resultado RMSE radiales cercanos al tamaño de píxel. Por otro lado, Li [Li et al., 2018b] aplicó el método de regresión simple aplicando algoritmos evolutivos específicamente los de tipo genéticos (GA) y comparando su resultado con la aplicación del algoritmo de *Particle Swarm Optimization* (PSO) [Cyriac and Rastogi, 2013] dando como resultado que es más óptimo la aplicación del algoritmo PSO lo que es congruente con los resultados que obtuvo Yavari [Yavari et al., 2013].

Con relación a los usos recientes del algoritmo PSO, Alizadeh Moghaddam [Alizadeh Moghaddam et al., 2018] lo aplicó a través del *Figure Condition Analysis* [Topan, 2013, Topan and Kutoglu, 2009], siendo esta técnica soporte a la función *fitness* que corresponde al RMSE radial de los puntos de control empleados en el ajuste, lo anterior provocó que las ortoimágenes generadas alcanzaran una exactitud posicional inferior al tamaño de píxel en los casos que fueran empleados entre 10 y 20 puntos de control, debido a que se seleccionaron y ajustaron solo los RPC esenciales para ajustar el modelo RFM. Por otro lado, Jannati [Jannati and Valadan Zoej, 2015] aplicó el método por modificación genética en cada una de las iteraciones que necesita el ajuste, los resultados fueron adecuados debido a que elimina el sesgo de los parámetros, siendo eficiente cuando fueron utilizados entre 15 y 20 puntos de control. Por consiguiente, la aplicación del algoritmo PSO resulta más adecuada que los GA, no obstante sigue siendo un inconveniente su uso por el costo computacional que acarrea y por lo tanto se han investigado recientemente alternativas como el uso de análisis de componentes principales (PCA) [Naeini et al., 2019].

A partir de la revisión del estado del arte, se evidencio que referente a los insumos de cada investigación hubo carencias respecto a la caracterización de origen y la precisión de las fuentes de los puntos de control y de chequeo [Aguilar et al., 2017, Zhang et al., 2016]. Por lo tanto, hacen falta investigaciones que señalen las implicaciones de la calidad de la fuente de los puntos en relación al ajuste de los coeficientes del modelo RFM, en relación a este aspecto, Widyaningrum [Widyaningrum et al., 2016] demuestra la mayor exactitud posicional de escenas satelitales ortorrectificadas con puntos de control obtenidos a partir de observaciones GNSS y el Terra SAR-X DEM en comparación a las mismas escenas satelitales

ortorrectificadas a partir del STRM de 30m. Sin embargo, la comparación fue incompleta debido a que el DEM empleado en ambos casos es de diferente naturaleza y adicionalmente no mencionan la exactitud posicional de los puntos de control junto a la vertical del DEM, es decir se desconoce cómo estas características afectaron la exactitud posicional de las ortoimágenes finales.

En la investigación anterior y en la mayoría de las consultadas se observó que fue común extraer los puntos de chequeo de la misma fuente de los puntos de control [Aguilar et al., 2017, Aguilar et al., 2012a, Konugurthi et al., 2016, Lee et al., 2017, Yavari et al., 2018, Zhang et al., 2018], lo cual para la validación de productos cartográficos finales es válido si los puntos de chequeo son de tipo GNSS debido a que la exactitud de este insumo es cercana a 0.1 m [IGAC, 2016b] y cumple con la condición expuesta por la *American Society for Photogrammetry and Remote Sensing* (ASPRS) [Heidemann et al., 2013] sobre que los puntos de validación deben provenir de una fuente tres veces más exacta que el producto final buscado.

La exactitud vertical del DEM de cubrimiento mundial (GDEM) no es caracterizada de forma apropiada y no se ha respondido con claridad si para la ortorrectificación es más eficiente poseer este indicador bajo el estándar recomendado o si es más importante poseer una exactitud relativa adecuada del DEM con relación al tipo de terreno de la imagen satelital [Aguilar et al., 2017]. La anterior pregunta surge dado que cada país posee su propio sistema vertical [Sjöberg, 2013] y de esta condición depende la exactitud vertical del DEM y para la mayoría de GDEM este indicador no es conforme, debido a que el método empleado para transformar las cotas ortométricas del DEM al sistema vertical oficial no es el más adecuado.

Pocas investigaciones han empleado como variable a analizar (en las pruebas de ortorrectificación) la variación del ángulo de incidencia de toma de la imagen [Alizadeh Naeini et al., 2019, Belfiore and Parente, 2016]. Por lo anterior, se desconoce las implicaciones que deberían ser consideradas del ángulo de incidencia de la imagen en relación con la calidad del DEM. Puesto que se ha señalado que si estos dos parámetros no son adecuados la probabilidad es muy alta de que exista presencia de distorsiones y desplazamientos en las zonas de alta pendiente y en las no cubiertas por los puntos de control [Poli and Toutin, 2012]. Lo anterior motivó el planteamiento de estrategias que con su implementación solucionen este inconveniente como el ya mencionado método *Spline* [Zhang et al., 2016].

Los métodos computacionales son más robustos y adecuados para el ajuste del modelo RFM que los determinísticos y estadísticos [Alizadeh Moghaddam et al., 2018, Jannati and Valadan Zoej, 2015, Valadan Zoej et al., 2007], sin embargo, aún existen dudas sobre el número adecuado de puntos de control para su estimación junto a su distribución espacial. Dentro de la revisión bibliográfica se identificó que recomiendan en la mayoría de los casos entre 15 y 21 puntos [Hariyanto et al., 2019, Jannati and Valadan Zoej, 2015, Shen et al., 2017], pero este

número varía según el grado del modelo junto al método de optimización que es expuesto en la publicación. Los estándares NSSDA [Ariza-López et al., 2018] y ASPRS [Heidemann et al., 2013] precisan que el número debe ser mínimo 20 y debe poseer una distribución regular los puntos de chequeo siendo esto para la evaluación de la ortoimagen final, puesto que esta evaluación es la misma para cualquier ortoimagen sin importar el sensor y fuente de donde provenga, no quedando claro si este puede variar de acuerdo con la resolución espacial de la ortoimagen, el área de la imagen y el tipo de terreno y cobertura de la imagen, es decir, falta estandarizar estos parámetros con relación al proceso.

En todas las investigaciones consultadas es utilizado el RMSE radial como indicador de la exactitud posicional, pero en ninguna detallan y verifican los supuestos que deben cumplirse en los residuales de los puntos de chequeo, los cuales son: normalidad, independencia y homogeneidad [Heidemann et al., 2013] dado que aplican el estándar NSSDA. Por consiguiente, es clara la necesidad de realizar una investigación que emplee otros indicadores de exactitud posicional para la evaluación de los productos del proceso de ortorrectificación [Mozas and Ariza, 2011], y esta misma este basada en un análisis estadístico riguroso como sustento de su replicación existiendo como antecedente la investigación de Lencinas [Lencinas and Díaz, 2011].

En conclusión, es necesario el fortalecimiento del estudio de la ortorrectificación en imágenes monoscópicas VHR de zonas boscosas y de alta montaña, debido a la dificultad de aplicar los métodos propuestos en la mayoría de las investigaciones consultadas, ya que los estudios referenciados investigaron en su mayoría el ajuste de escenas satelitales [Aguilar et al., 2017, Fraser et al., 2006, Hong et al., 2015, Jeong, 2017, Wang et al., 2016, Ye et al., 2017] con insumos de alta calidad (bastantes puntos GNSS y MDT fotogramétrico de toda el área de estudio) en áreas urbanas [Aguilar et al., 2017, Aguilar et al., 2012a, Barazzetti et al., 2016, Yavari et al., 2018] de topografía plana y pocos aplicaron la metodología propuesta en áreas topográficas de características distintas [Wang et al., 2016, Yavari et al., 2018]. Mientras que solo un estudio investigo el ajuste de imágenes monoscópicas [Li et al., 2018a] aplicando PSO, en zonas rurales planas en una área aproximada de 4.000 ha, pero no estandarizó las características de los puntos de control, por tanto no se tiene una referencia para el número de puntos y su tipo de distribución espacial (regular o irregular).

3. Datos y Métodos

El capítulo 3 está organizado en tres secciones que corresponden respectivamente a: (i) presentación de dos zonas de estudio, (ii) descripción de cada uno de los datos utilizados en el proyecto de investigación; y (iii) explicación de los métodos empleados en cada una de las tres fases para el desarrollo de la investigación presentada.

3.1. Descripción de las zonas de estudio

La disponibilidad de fotografías aéreas de diferentes fechas, suficientes puntos de control, DEM de alta precisión e imágenes satelitales monoscópicas VHR de zonas del país escarpadas y preferiblemente priorizada por el proyecto de catastro multipropósito fueron los cinco aspectos principales para la selección de las zonas de estudio en las que fue aplicado y analizado el método propuesto. La Subdirección de Geografía y Cartografía del Instituto Geográfico Agustín Codazzi permitió sin restricción alguna la consulta de sus distintas bases de datos de insumos fotogramétricos e imágenes satelitales administradas por el Banco Nacional de Imágenes (BNI). Fueron seleccionadas dos áreas de estudio con el propósito de aplicar el método en regiones distintas de Colombia en aspectos como clima, paisaje y dinámicas socio-culturales que se traduce en los usos que posee el suelo.

3.1.1. Valledupar

La primera área de estudio corresponde a la zona urbana y rural de la capital de departamento del Cesar, Valledupar ubicada en el norte del país, se caracteriza geográficamente por la presencia del sistema de montañoso de la Sierra Nevada de Santa Marta [Cornelius Raasveldt, 2017], el cual ocupa cerca del 40 % del área total del municipio [Ramírez and Alcalde, 2016]. En la zona rural conviven las culturas indígenas de los Aruhacos, Kogui, Kankuamos, Wiwa y Yukpa, de aquí radica su importancia cultural, así mismo, se caracteriza por ser una región biodiversa, debido a la presencia de todos los pisos térmicos [Ramírez and Alcalde, 2016], pues las alturas sobre el nivel medio de mar en el municipio de Valledupar fluctúan desde los 50 metros hasta los 5430 metros.

De acuerdo con la Encuesta Nacional Agropecuaria (ENA) del DANE y con los indicadores propios de la alcaldía municipal de Valledupar, las actividades productivas agropecuarias han

disminuido en los últimos diez años siendo reemplazadas significativamente por las actividades mineras [Ramírez and Alcalde, 2016], esta actividad se ha visto como una amenaza para la conservación de las áreas protegidas, como el Parque Nacional Natural (PNN) de la Sierra Nevada de Santa Marta [Instituto Humboldt and Fundación Erigaie, 2015], por lo que se ha visto la necesidad de realizar monitoreo continuo de estas zonas con insumos adecuados como lo son ortoimágenes de buena resolución espacial y temporal.

Los acuerdos de paz [De la Calle et al., 2016] categorizan a Valledupar como un municipio afectado por el conflicto armado, es decir es una zona de postconflicto, por lo anterior el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD) [Villa and Herrera, 2016], realizó una caracterización demográfica de la población, señalando que tanto el gobierno local como el nacional deben aumentar los esfuerzos en sus políticas y programas de desarrollo con un enfoque regional, para atender oportunamente las necesidades de las víctimas del conflicto armado (tanto los desplazados como las personas nativas del municipio) y así desacelerar el crecimiento de la pobreza en el municipio de Valledupar.

A partir de la determinación de los municipios de postconflicto se diseñó el Plan Nacional de Cartografía del IGAC [IGAC, 2017], el cual realizó una caracterización del estado cartográfico de Valledupar, señalando que en el período 2010 - 2016 no fue realizada ninguna actualización de la información cartográfica a ninguna escala. Debido a la anterior, la generación de la cartografía básica del municipio de Valledupar fue priorizada en las zonas de actualización de información cartográfica, por consiguiente fue categorizada al área rural del municipio en la zona 5 [IGAC, 2017] como se visualiza en la figura **3-1**, con un área estimada de producción cartográfica de 414.074 ha para cartografía 1:25.000 generada a partir de imágenes satelitales de resolución espacial mínima de 1 metro, mientras que en la cabecera municipal y los centros poblados están presupuestados dentro de la zona 9 con un área estimada de 693.7 ha para cartografía 1:2.000 [IGAC, 2017] producidas a partir de ortofotomosaicos generados de fotografías aéreas de resolución espacial menor a 0.2 m.

Para el presente proyecto de investigación es estudiada la eficiencia del método en un área objetivo de 6.198 ha, las cuales comprende la cabecera municipal y zonas rurales aledañas como se muestra en la Figura **3-2**, debido a que este es el cubrimiento del fotocontrol de validación. La zona de interés está conformada por dos tipos de topografía: la primera corresponde a un territorio escarpado, correspondiente a áreas rurales y de expansión urbana, mientras que la segunda es plana que cubre la mayor parte de la cabecera municipal de Valledupar.

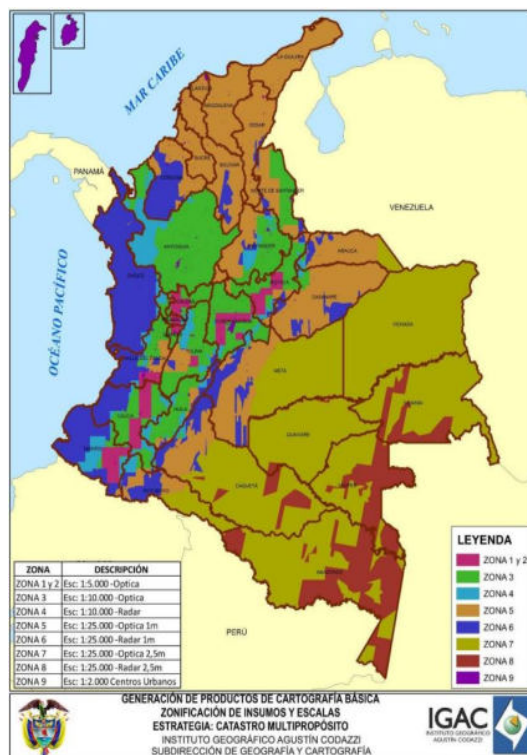


Figura 3-1.: Plan Nacional de Cartografía Básica de Colombia.

Fuente: [IGAC, 2017]

3.1.2. Sabana de Bogotá y Guavio

La segunda zona de estudio se encuentra ubicada en la zona central de Colombia colindante con la capital del país Bogotá D.C., específicamente en el departamento de Cundinamarca, este conglomerado de municipios pertenecen a las regiones de la sabana centro de Bogotá y la provincia del Guavio, el factor diferenciador de esta zona del país es la presencia de la laguna de Guatavita [Rondón et al., 2010] y, adicionalmente se caracteriza por ser uno de los principales corredores industriales y agropecuarios del país.

La zona de la sabana centro de Bogotá se ha caracterizado por su vocación industrial, en donde se concentra cerca del 49% de las empresas que tienen participación activa en las actividades de la capital de Colombia [Cámara, 2015], además de poseer uno de los principales corredores viales terrestres del país correspondiente a la autopista Bogotá - Tunja, que permite la comunicación con las zonas agrícolas del departamento de Boyacá. Por otro lado, la provincia del Guavio se caracteriza por su vocación agrícola, debido a que cerca del 70% de su producción económica proviene de cultivos transitorios [Cámara de Comercio de Bogotá, 2010]. Por consiguiente, la importancia económica como de movilidad de estos municipios es significativa siendo una zona estratégica para el desarrollo de todo el país.

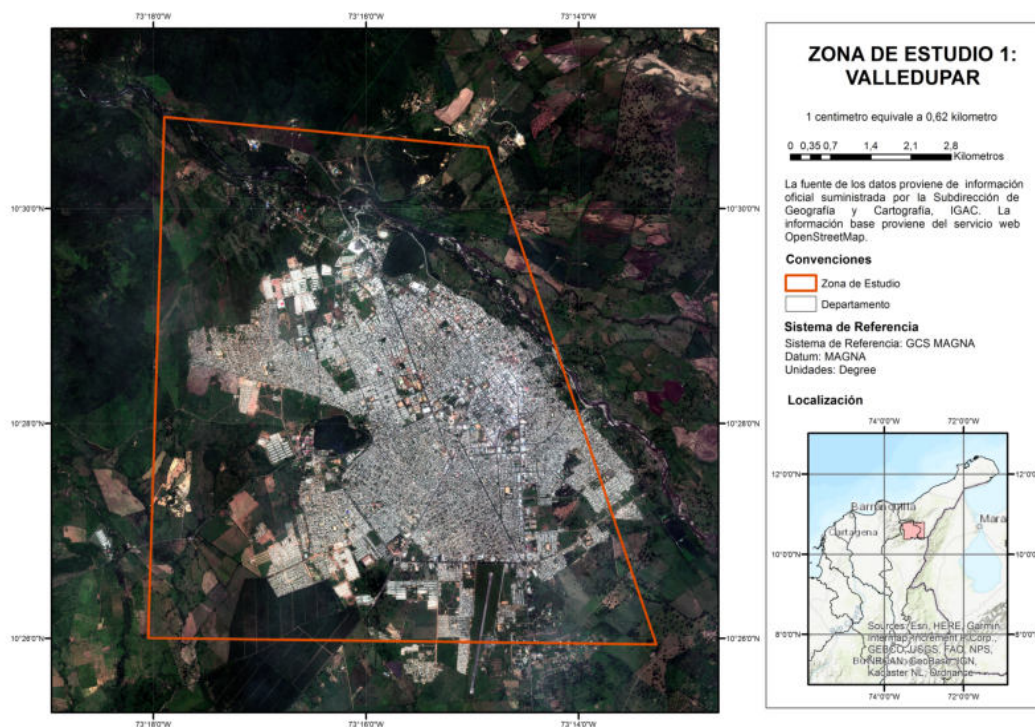


Figura 3-2.: Zona de estudio: Valledupar con imagen WorldView-2 de fecha de toma del 2010.

Fuente: La imagen WorldView-2 proviene de información oficial custodiada y administrada por el BNI, perteneciente al IGAC. La información de contexto corresponde a la disponible por el servicio geográfico web de *Open Street Map*.

Esta zona del país debido a su elevada dinámica espacial e inversión pública es una de las pocas del país que posee productos cartográficos actualizados y detallados, por lo que es propicio para la aplicación del método por disponibilidad de información exacta. La zona de estudio corresponde a áreas parciales de los municipios de Zipaquirá, Cajica, Chia, Sopo, Tocancipa, Gachancipa, Guatavita y Guasca los cuales corresponden a las regiones de sabana centro y provincia del Guavio como se observa en la figura 3-3. El Plan Nacional de cartografía categoriza esta región de Cundinamarca para producción de cartografía en la zona rural toda a escala 1:10.000 proveniente de imágenes ópticas de resolución espacial menor a 1 m y los centros poblados a escala 1:2.000 a partir de fotografías aéreas [IGAC, 2017].

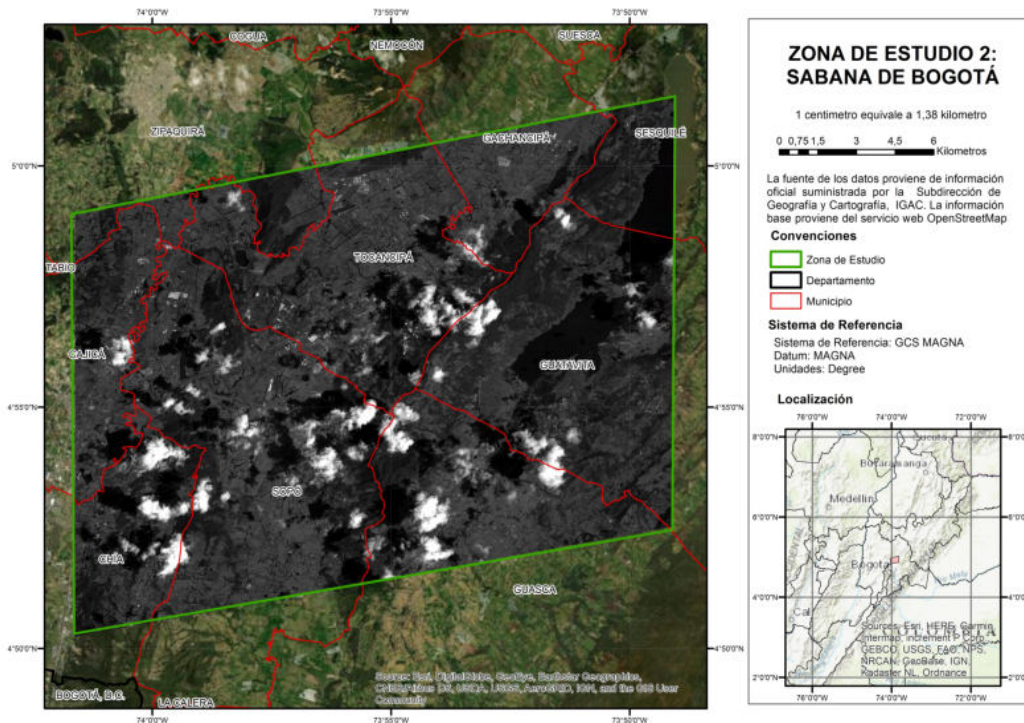


Figura 3-3.: Zona de estudio: Sabana de Bogotá con imagen WordlView-2 de fecha de toma del 2011.

Fuente: La imagen WordlView-2 proviene de información oficial custodiada y administrada por el BNI, perteneciente al IGAC. La información de contexto corresponde a la disponible por el servicio geográfico web de *Open Street Map*.

3.2. Materiales

En esta sección es solo especificado el hardware utilizado para el desarrollo del método propuesto, este pertenece al autor de la investigación presentada. Se aclara que los software necesarios son especificados en cada uno de los procesos descritos en la sección de métodos.

3.2.1. Hardware

Para el desarrolló de los distintos experimentos se utiliza una estación fotogramétrica. Este equipo posee un procesador Intel Core i7 de octava generación, ideal para flujos que demandan bastante recurso computacional junto a una memoria RAM de 16 GB y una tarjeta de video NVIDIA QUADRO P600 compatible con sistemas de visión estereoscópicas. La particularidad de este tipo de equipos es que poseen un sistema de visión estereoscópica,

precisamente el computador caracterizado posee el sistema NVIDIA 3D Visión de segunda generación conformado por un monitor de frecuencia de 144 Hz, lentes estereoscópicas pasivos y su emisor. Además, para realizar labores de captura estereoscópica el equipo cuenta con un mouse 3D de referencia Stealth de segunda generación. En la figura 3-4 se muestra el equipo utilizado y en la tabla 3-1 de forma más detallada las especificaciones del equipo.



Figura 3-4.: Equipo utilizado para la realización de las pruebas del presente documento.

Tabla 3-1.: Características del equipo utilizado en las pruebas de ortorrectificación

Sistema operativo
- Windows 8.1 de 64 bits.
Hardware
- Procesador Intel Core i7-8700 CPU @ 3.20GHz
- Memoria RAM 16 GB.
- Tarjeta de Video NVIDIA QUADRO P600 4 GB.
- Disco duro 1 TB.
- Disco duro de estado sólido de 256 GB.
- Monitor de 21" Benq de frecuencia de 144 Hz y Monitor de 21" DELL de frecuencia de 120 Hz
- Sistema de visión estereoscópica NVIDIA 3D Vision 2.
- Mouse 3D Stealth de segunda generación.

3.3. Datos

Para el desarrollo del método propuesto son necesarios múltiples insumos de diferente naturaleza, como lo son bloques fotogramétricos de fotografías aéreas con sus respectivos puntos de control, tres imágenes satelitales VHR y distintos DEM, los insumos anteriormente descritos fueron proporcionados en su mayoría por el IGAC mientras que los demás descargados de plataformas de datos geográficos de acceso libre.

3.3.1. Fotografías aéreas

La identificación de las fotografías aéreas necesarias en cada zona de estudio no fue impedimento alguno gracias a la organización apropiada que posee el IGAC de este tipo de imágenes. Fueron seleccionadas fotografías aéreas con temporalidad superior al año 2004 debido a que esta fecha correspondió al año de toma del cubrimiento rural más reciente de la zona rural de Valledupar, mientras que en la sabana de Bogotá las fotografías más antiguas corresponden al año 2009.

Son empleadas solamente fotografías tipo *frame*, caracterizadas por realizar la toma del área de interés en el mismo instante de tiempo [Aber et al., 2019], es decir cada una posee sus propios parámetros de la orientación exterior, los cuales corresponden a las coordenadas de su centro de proyección (punto principal de la fotografía) X, Y, Z y los ángulos de movimiento del avión omega, phi y kappa [Heipke, 1997]. Dentro de las fotografías utilizadas se encuentran de dos clases: análoga y digitales, las cuales difieren en el tipo de cámara métrica que poseen y por lo tanto en el flujo de procesamiento de cada una de ellas [Konugurthi et al., 2016]. En la presente investigación se utilizaron imágenes provenientes del sensor WILD RC-30 (cámara análoga) y de la Vexcel Ultracam D (cámara digital).

Las fotografías digitales empleadas poseen parámetros iniciales de orientación exterior que corresponde al resultado del posprocesamiento de los datos del sistema GNSS/INS [Aber et al., 2019] del sensor. Este tipo de fotografías son tomadas en las bandas espectrales del visible (RGB) y la del infrarrojo cercano (NIR).

Por otro lado, las fotografías análogas utilizadas son digitalizadas, debido a que originalmente estas se encuentran reveladas en un rollo fotográfico en la banda espectral del pancromático, esta es una característica usual de este tipo de aerofotografías [Konugurthi et al., 2016]. Debido a que este tipo de insumo no posee algún tipo de información de ubicación espacial capturada al momento de la toma de la fotografía, como información de referencia espacial es utilizada la disponible de los vuelos de cada una de ellas en la base de datos fotogramétrica oficial del IGAC.

Las fotografías que posee el IGAC son producto de los planes de producción de cartografía básica que posee la institución desde la década de 1930 [IGAC, 2017], por lo que los planes de vuelos asociados a las tomas corresponden explícitamente a sus metas internas, por esta razón no existe una resolución temporal periódica entre las fotografías utilizadas. En total se utilizan 2527 fotografías correspondientes a seis bloques fotogramétricos, de las cuáles 1027 conforman los cuatro bloques fotogramétricos de Valledupar y, 1527 son fotografías digitales disponibles de la sabana de Bogotá y la provincia del Guavio, esta información se puede visualizar con más detalle en la tabla **3-2**.

Tabla 3-2.: Fotografías aéreas utilizadas

Zona	Bloque	Sensor	Fecha de captura	GSD (m)	Cant. Fot.
Valledupar	VLL06	WILD RC-30	01/02/2004	0.15	60
	VLL04R	WILD RC-30	01/04/2004	0.5	180
			01/09/2006		
	VLL08	Vexcel Ultracam D	12/07/2008	0.15	191
	VLL14	Vexcel Ultracam D	28/10/2014	0.15	596
Sabana de centro y Guavio	G10	Vexcel Ultracam D	04/12/2009	0.3	1045
			-		
			03/02/2010		
	G16	Vexcel Ultracam D	18/01/2016	0.25	528
		-			
			27/01/2016		

3.3.2. Puntos de control: control terrestre

El fotocontrol, puntos de control o también conocido como control terrestre utilizado en las distintas etapas del desarrollo de la actual investigación es proporcionado en su totalidad por el IGAC, esta información fue consultada en una de las primeras versiones de la Base Nacional de Puntos de Control que levantó y ahora mantiene la Subdirección de Geografía y Cartografía. Gracias a esta herramienta fue posible identificar y solicitar con facilidad el total de puntos levantados con técnicas GNSS que poseen históricamente la institución. Estos puntos fueron planeados y ejecutados de acuerdo a las metas de producción cartográfica que posee el IGAC, estando estrechamente relacionado con la toma de fotografía aérea [IGAC,

2017], es decir asociados a los distintos proyectos de producción cartográfica que realiza la entidad en las dos zonas de estudio.

Estos puntos corresponden a los levantamientos en campo con equipos de posicionamiento global siguiendo los procedimientos, procesamientos GNSS y especificaciones técnicas vigentes para este tipo de producto [IGAC, 2016a], en cada fecha de rastreo. En total se utilizan 221 puntos de control terrestre correspondientes a capturas realizadas entre 1997 y 2019. De los anteriores se utilizan 128 en Valledupar, distribuidos así: para el ajuste en bloque fotogramétrico 84 y para el proceso de validación 44 (tanto del bloque como de ortoimágenes). En la sabana de Bogotá 73 puntos de control se utilizaron en el ajuste y 20 para la validación. La figura 3-5 muestra la distribución espacial de los puntos utilizados en Valledupar y la figura 3-6 los usados en sabana centro y Guavio. En ambas figuras (3-5 y 3-6) los puntos rojos corresponden a los puntos de control utilizados para el ajuste, mientras que los azules corresponden a los puntos de validación.

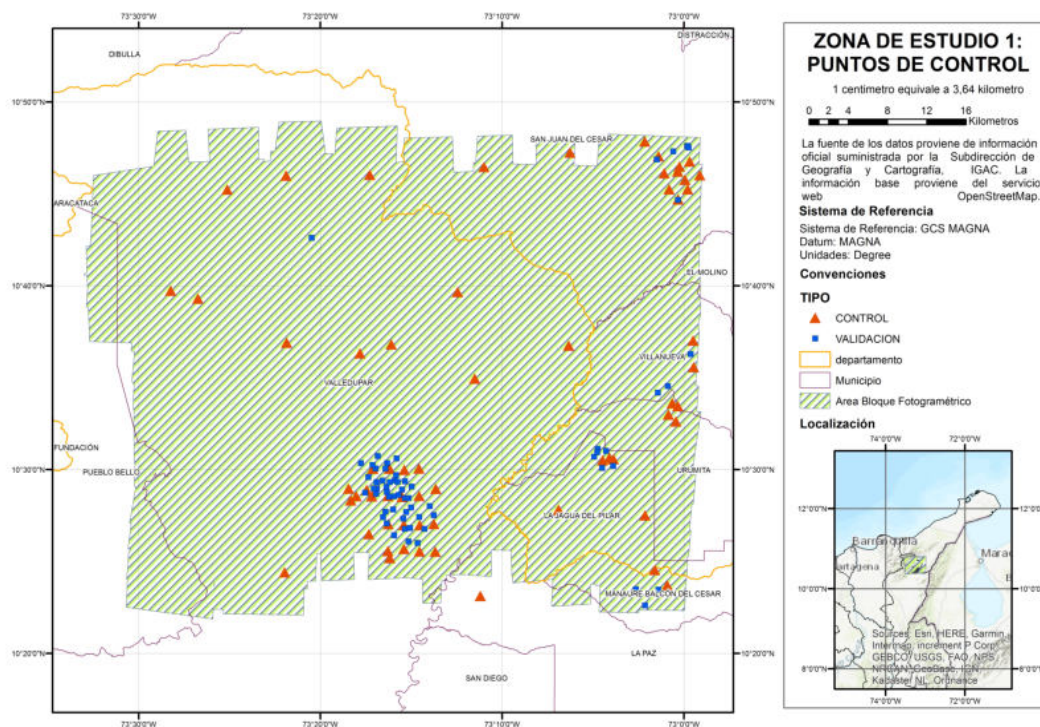


Figura 3-5.: Puntos de control utilizados en Valledupar.

Fuente: La información de los puntos de control proviene de lo reportado por la Base Nacional de puntos de Control del IGAC. La información de contexto corresponde a la disponible por el servicio geográfico web de *Open Street Map*

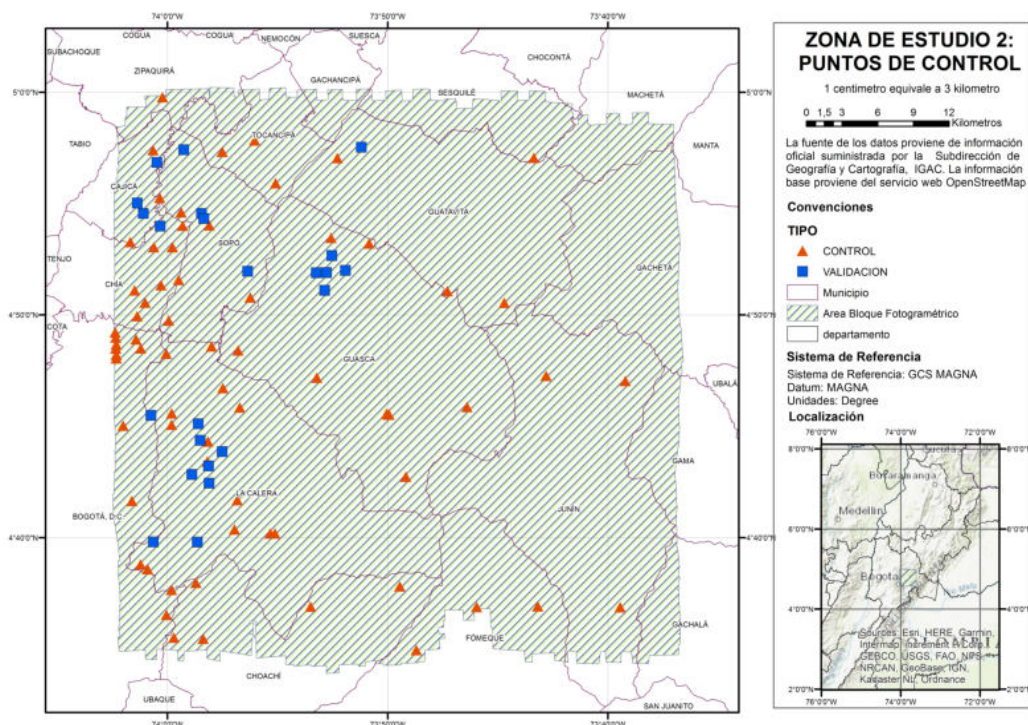


Figura 3-6.: Puntos de control utilizados en la sabana de centro y Guavio.

Fuente: La información de los puntos de control proviene de lo reportado por la Base Nacional de puntos de Control del IGAC. La información de contexto corresponde a la disponible por el servicio geográfico web de *Open Street Map*

3.3.3. DEM

Para el método es necesario disponer de un *Digital Elevation Model* DEM que cubra totalmente la zona de interés, por esta razón se uso solo de dos tipos: fotogramétrico [Aguilar et al., 2012a] y de cubrimiento mundial o también conocido como *Global Digital Elevation Model* (GDEM) [Lee et al., 2017]. En la tabla 3-3 se detallan los DEM utilizados en las dos zonas de estudio.

Tabla 3-3.: DEM Utilizados

Zona	DEM	Sensor	Generación	Fecha de captura	Ángulo	GSD (m)
1 y 2	ALOS-PALSAR	Dataset / ALOS Palsar	Automático	2008-2011	34.3	12.5
1 y 2	SRTM	SAR	Automático	2000	30-58	30
2	RESTITUCIÓN	Vexcel Ultracam D	Semiautomático	2009 - 2010	N/A	10
1	TREx	Tandem x	Semiautomático	2012	N/A	12

El MDT fotogramétrico o también conocido como de restitución (REST), es de producción

y uso interno en el IGAC para escala 1:10.000 en las zonas rurales, este producto posee una resolución espacial de 10 m y solamente se encuentra disponible para la zona de la sabana centro y Guavio. El DEM es obtenido con el interpolador espacial determinístico de *Nearest Neighbor* [Kobler et al., 2007], siendo este un proceso estándar dentro del flujo interno de la entidad. El interpolador es aplicado a la captura estereoscópica de los objetos geográficos que se encuentran a nivel de terreno (como curvas de nivel, drenajes y puntos de cota fotogramétrica) del catálogo de objetos de escala 1:10.000 [IGAC, 2016a].

Para las dos zonas de estudio es utilizado el GDEM *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM) de 30 m, el cual es el resultado final de la misión SRTM realizada en febrero del año 2000 [Farr et al., 2007]. Los datos de elevación fueron obtenidos a través de un sistema de radar especialmente modificado a bordo, con resolución espacial de un arcosegundo que equivale aproximadamente a 30 m [Gomez and Deccechis, 2008]. Este producto fue el primer GDEM que logro obtener cubrimiento total y homogéneo de todo el mundo [Farr et al., 2007]. Este GDEM fue dispuesto libremente por el gobierno de Estados Unidos en el año 2015 y fue estimado que en la zona de Suramericana presenta exactitudes posicionales radiales de 9 m y verticales de 6.2 m a un 90 % de confianza [Farr et al., 2007].

Desde la página *ASF Data Search* de la NASA¹ fueron descargadas las escenas correspondientes a las dos zonas de estudio del GDEM ALOS PALSAR, este DEM posee una resolución espacial de 12.5 m correspondiente a las tomas de imágenes de radar sintético PALSAR desde la plataforma de *Advanced Land Observation Satellite* (ALOS) perteneciente a la Agencia Japonesa de Exploración Aeroespacial (JAXA) [Wang et al., 2016]. La plataforma ALOS realizó capturas en el período comprendido del año 2006 al 2011 de toda la tierra y estas escenas son de libre acceso [Ningthoujam et al., 2018]. Con relación con las dos zonas de estudio fueron descargadas las imágenes ALOS de los años 2008 a 2011 de cada zona y se realizó el respectivo mosaico de cada una, con el fin de establecer un DEM homogéneo para su uso en todos los experimentos.

El GDEM TREx es reciente y aún esta en desarrollo, correspondiendo su dirección por la Agencia Nacional de Inteligencia Geoespacial de Estados Unidos (NGA, sus siglas en inglés), la Oficina Federal para Cartografía y Geodesia de Alemania (BKG, sus siglas en alemán) y la empresa Airbus Group, en donde distintos países están participando en la realización del producto final con una resolución espacial estimada de 12 m y este es revisado y aprobado por las organizaciones que presiden el proyecto [Yepes Rodríguez, 2018]. Este DEM surge del procesamiento de los datos capturados por la misión TanDEM-X, en donde por interferometría de radar de apertura sintética en la banda X y el modelo *TREx DEM Raw* (TDR) forman la imagen cruda que cubre un *tile* equivalente a un área de un grado por un grado, que debe ser procesada y editada por cada uno de los países participantes [Yepes Rodríguez, 2018].

¹<https://search.asf.alaska.edu/>

Para Colombia, el IGAC desde el año 2017 ha participado activamente en dicho proyecto procesando los *tiles* correspondiente al país, para el caso de las zonas de estudio se encuentra aprobado el *tile* que cubre Valledupar, por lo que solo es posible utilizarlo en esta zona de estudio.

3.3.4. Imágenes VHR

Las imágenes VHR empleadas en las dos zonas de estudio corresponden a la misión satelital WorldView-2 la cual fue lanzada en Octubre de 2009 y continua aún en orbita a una altitud de 770 km con una resolución temporal promedio de 4 días, posee dos sensores de barrido [Cyriac and Rastogi, 2013] uno que captura la banda del pancromático con la mejor resolución espacial de 0.46 m remuestreada a 0.5 m para fines comerciales y, otro que realiza la captura de las imágenes multiespectrales en las bandas de *Coastal* (0.400-0.450 μm), *Blue* (0.450-0.510 μm), *Green* (0.510-0.580 μm), *Yellow* (0.585-0.625 μm), *Red* (0.630-0.690 μm), *Red Edge* (0.705-0.745 μm), *Near-IR1* (0.770-0.895 μm) y *Near-IR2* (0.860-1.040 μm) a una resolución espacial de 1.85 m remuestrada al usuario a 2 m. Las dos capturas la realiza en una resolución radiométrica de 11 bits [Jawak and Luis, 2013]. Para las dos zonas de estudio son usadas imágenes con toma en las bandas espectrales de *Red*, *Green*, *Blue*, *Near-IR1* y pancromática, las cuales son especificadas en la tabla 3-4.

Tabla 3-4.: Imágenes VHR utilizadas

ID	Fecha de captura	Zona	Ángulo de incidencia	Área (ha)	Pendiente
WV2 2010	11/10/2010	Valledupar	12.8	30400	Plano - Ondulado
WV2 2014	23/12/2014	Valledupar	27	32750	Plano - Escarpado
WV2 2011	02/01/2011	Sabana de Bogotá	28.4	41000	Plano - Ondulado

3.4. Métodos

El flujo metodológico se realiza mediante tres etapas organizadas de esta forma: (i) preparación y aseguramiento de los insumos necesarios para la ortorrectificación, (ii) ejecución y evaluación del resultado de la ortorrectificación a través de mínimos cuadrados ordinarios (OLS) que posee como propósito determinar los set datos que se analizan en la última etapa;

(iii) ortorrectificación con PSO junto a la validación de las ortoimágenes para su uso en escala 1:10.000

3.4.1. Etapa 1 - Caracterización, procesamiento y preparación de los insumos necesarios para la ortorrectificación

La primera etapa se ocupa de la preparación de los insumos para la realización de los experimentos de ortorrectificación, así teniendo en cuenta lo anterior los procesos necesarios son mostrados en la figura 3-7.

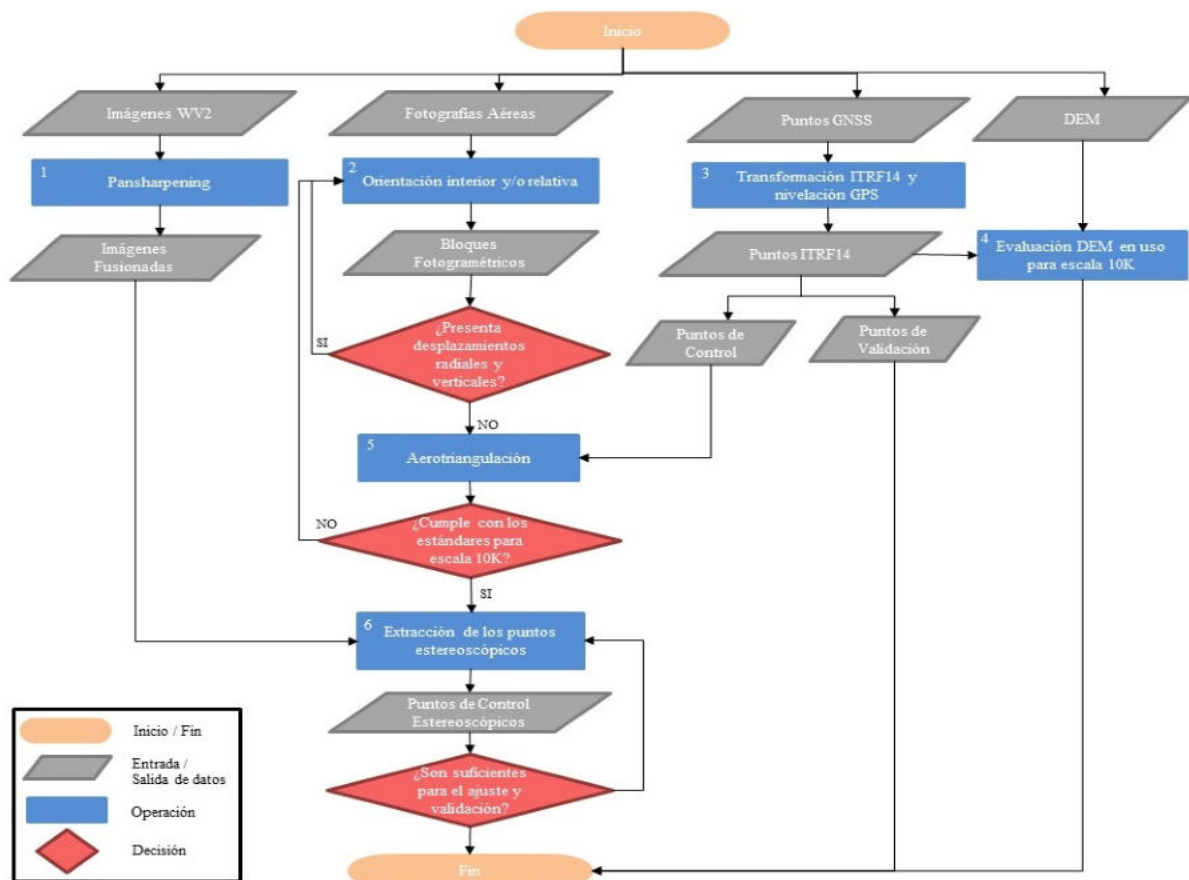


Figura 3-7.: Procesos de la primera etapa correspondiente a caracterización, procesamiento y preparación de los insumos necesarios para la ortorrectificación.

De acuerdo al flujo metodológico de la primera etapa expuesto en la figura 3-7 los procesos iniciales realizados a partir de las imágenes WV2, fotografías aéreas y puntos GNSS se realizan de forma paralela, para mayor claridad son explicados respectivamente a continuación.

El primer proceso es el de fusión de imágenes *pansharpening*. Este proceso se realiza con cada una de las imágenes WV2 de la tabla 3-4 por el método bayesiano [Meng et al., 2019] que da como resultado la mejor resolución espacial para cada una de las cuatro bandas espectrales. El método bayesiano fue escogido por los buenos resultados que ha obtenido en la aplicación de imágenes WorldView-2 [Tu et al., 2012], por lo que es realizado con el algoritmo que dispone la biblioteca de alto rendimiento de procesamiento de imágenes *Orfeo Toolbox*, la cual es ejecutada desde el software QGIS 3.10 Coruña (publicado en noviembre de 2019) y esta orientado al procesamiento en masa de imágenes satelitales HR y VHR [Dupuy et al., 2020].

El segundo proceso es la construcción de los bloques fotogramétricos a partir de la preparación de sus correspondientes fotografías aéreas especificadas en la tabla 3-2. En este proceso se realiza la orientación interior y relativa de las fotografías aéreas pertenecientes a cada uno de los bloques fotogramétricos [Salach, 2017], como se observa con detalle en la figura 3-8.

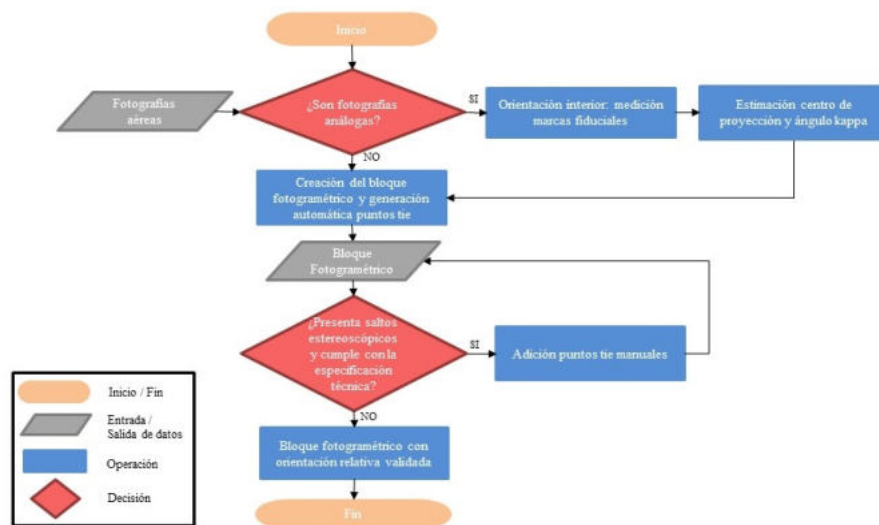


Figura 3-8.: Actividades asociadas al segundo proceso de la etapa 1 correspondiente a la construcción de los bloques fotogramétricos

La orientación interior es un proceso automático para las aerofotografías digitales mientras que en las análogas este proceso es semiautomático, debido a que consiste en la medición de cada una de las marcas fiduciales que posee la fotografía aérea [Rigden et al., 2005]. Con relación al procesamiento de las fotografías aéreas análogas de la tabla 3-2 en la mayoría de los casos la orientación interior es automática y requiere de pocos ajustes manuales, solo si es orientada la fotografía de forma correcta. El proceso anterior se realiza en la suite INPHO versión 6.0 (publicado en diciembre de 2014) en el módulo de *Interior Orientation*.

Para realizar la orientación relativa se debe contar con una georreferenciación de la fotografía

aérea, siendo el mejor escenario que corresponda a parámetros iniciales de su orientación exterior. Los parámetros de orientación exterior de las fotografías digitales corresponde al postproceso de los datos GNSS/INS [LaForest et al., 2019] mientras las aerofotografías análogas no posee este tipo de información. Por lo anterior, para cada una de las fotografías análogas se estiman sus centros de proyección y de acuerdo a la dirección de la línea de vuelo un valor aproximado del ángulo kappa [Aber et al., 2019], para todas las fotografías pertenecientes a la faja. Las estimaciones anteriores son posibles a partir de la información de referencia espacial disponible de los vuelos, específicamente a los objetos geográficos de *footprints* y líneas de vuelo asociados a los vuelos análogos en la base de datos fotogramétrica oficial del IGAC.

La orientación relativa es semiautomática, es decir partiendo de la generación automática de puntos *tie* a través de los algoritmos *Least Mean Square* (LSM) y *Feature Based Matching* (FBM) [Lerma et al., 2013] son revisados y agregados puntos *tie* de forma manual en las áreas del bloque que no cumplan con las consideraciones establecidas para las zonas Von Gruber [Aber et al., 2019]. La adición de puntos *tie* manuales tiene el propósito de asegurar que no existan desplazamientos radiales y verticales entre los modelos estereoscópicos que componen al bloque fotogramétrico [Lollino et al., 2015, Marek et al., 2015]. La revisión es realizada continuamente de forma estereoscópica en zonas aleatorias de cada uno de los bloque fotogramétricos hasta que se evidencie la poca presencia de saltos estereoscópicos en el bloque además de que los RMSE de la orientación relativa fueran menores en cada eje coordenado a 1.06 m y en z a 1.5 m, cumpliendo la especificación técnica vigente para el proceso de aerotriangulación correspondiente a la resolución 1392 de 2016 del IGAC [IGAC, 2016b]. Para los procesos anteriores se utilizan los módulos de la suite de INPHO versión 6.0 de MATCH-AT para la generación y medición de puntos manuales *tie* y DTMaster para la revisión estereoscópica.

El tercer proceso es la transformación de cada uno de los puntos de control y de validación (figuras 3-5 y 3-6) al sistema de referencia terrestre *International Terrestrial Reference System* 2014 (ITRF2014) que es usado de forma oficial en Colombia bajo el nombre de época 2018.0 [IGAC, 2018] junto al correspondiente procesamiento para obtener las cotas ortométricas en el sistema vertical oficial GEOCOL 2004 [IGAC, 2005]. Las actividades del proceso mencionado se observan en la figura 3-9. La obtención de los puntos de control en época 2018.0 se realiza con el uso del modelo de velocidades VEMOS2017 [Urrea, 2017], el cual es oficial y el más reciente dispuesto por el Sistema de Referencia Geocéntrico para Las Américas (SIRGAS) [Sánchez and Drewes, 2020].

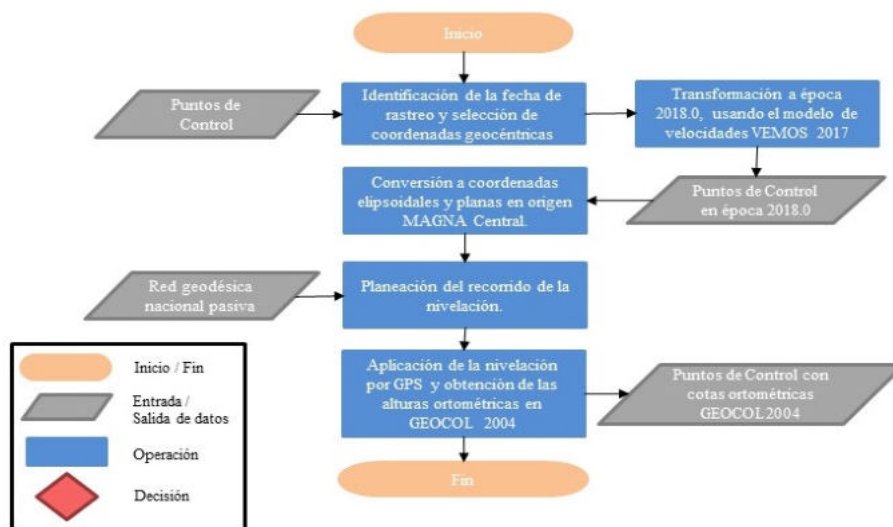


Figura 3-9.: Actividades asociadas al tercer proceso de la etapa 1 correspondiente a la transformación de los puntos de control a época 2018.0 y obtención de sus cotas ortométricas en el sistema vertical GEOCOL2004

El modelo VEMOS2017 es aplicado directamente a las coordenadas geocéntricas de los puntos de control a partir del conocimiento de la fecha de rastreo original, en este aspecto hay dos posibilidades: los puntos superiores al año 2004 se encuentran en la época anterior oficial (1995.4) y los restantes están en fecha de rastreo. Con las coordenadas geocéntricas en época 2018.0 se realiza la conversión a coordenadas elipsoidales y planas en el sistema MAGNA Central (EPSG: 3116), el cual era de uso oficial para cartografía rural 1.10.000 [IGAC, 2016b] antes del 14 de mayo del 2020, en las dos zonas de estudio. Las transformaciones y la aplicación del modelo de velocidades VEMOS2017 se realiza en el software MAGNAPRO 4.2 (publicado en el 2019) del IGAC.

Con relación a las cotas ortométricas se calculan en el sistema vertical oficial GEOCOL 2004 [IGAC, 2018], a partir de las alturas elipsoidales en época 2018.0. Las cotas ortométricas surgen de la realización del procedimiento oficial del IGAC conocido como nivelación por *Global Positioning System* (GPS). La nivelación por GPS utiliza las alturas elipsoidales y la información ortométrica de las bases de la red geodésica pasiva de la entidad [IGAC, 2016b] para la estimación de las alturas ortométricas. La información de las bases geodésicas es de libre acceso y se encuentra disponible para su descarga en la plataforma de datos abiertos del IGAC ². Todos los procesos anteriores al igual que la transformación de los puntos, son realizados en el software MAGNAPRO 4.2.

El cuarto proceso es la caracterización de cada uno de los DEM especificados en la tabla 3-3 buscando señalar si describe alturas elipsoidales u ortométricas [Aguilar et al., 2017, Kur-

²<https://geoportal.igac.gov.co/contenido/datos-abiertos-geodesia>

czyński et al., 2018] y si cumple la especificación técnica vigente para su uso en la escala 1:10.000 [IGAC, 2020]. Las alturas ortométricas junto a las elipsoidales de todos los puntos de control y validación (figuras **3-5** y **3-6**) se utilizan en la evaluación de la exactitud vertical de los DEM, debido a que corresponde a un insumo adecuado de acuerdo a lo que dispone el estándar [Ariza-López et al., 2018].

La evaluación de la exactitud vertical de los DEM se realiza a partir del error medio cuadrático vertical (ver ecuación 2-12) para cada tipo de altura, es decir la evaluación es con base a las alturas ortométricas y elipsoidales de los puntos de control. Por otro lado, se evalúa si el $RMSE_z$ calculado a partir de las alturas ortométricas, se encuentra por debajo de 3 m, siendo este el umbral para aceptar que el producto posee la exactitud vertical de la escala 1:10.000 [IGAC, 2020] y además se evalúan los otros aspectos que contempla la especificación.

El quinto proceso corresponde a la aerotriangulación de los bloques fotogramétricos preparados en orientación relativa a partir del fotocontrol identificado en época 2018.0 y GEOCOL 2004 [IGAC, 2016b], sus actividades se observan en la figura **3-10**. El proceso comienza con la identificación de los puntos de control en los distintos modelos estereoscópicos del bloque es de forma estereoscópica [Korsgaard et al., 2016]. Los puntos de control para ser seleccionados en el ajuste de cada uno de los bloques fotogramétricos procesados deben cumplir las siguientes características: (i) una distribución regular en toda la zona de interés, (ii) fotoidentificables y (iii) temporalidad cercana a la toma de las fotografías aéreas [Aber et al., 2019], con el propósito de aprovechar al máximo el fotocontrol más antiguo. La medición estereoscópica y el ajuste del bloque son realizados en los correspondientes módulos de MATCH-AT de INPHO versión 6.0.

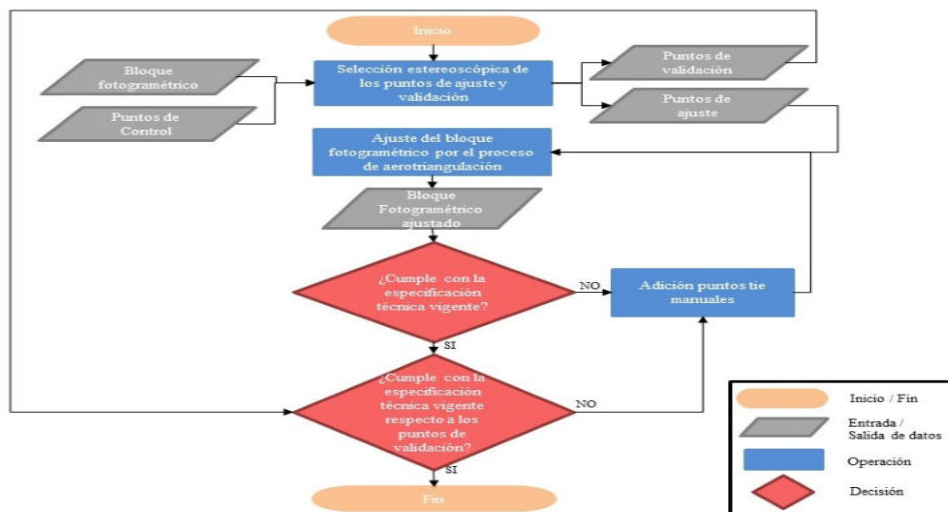


Figura 3-10.: Actividades asociadas al quinto proceso de la etapa 1 correspondiente a la aerotriangulación y validación de los bloques fotogramétricos

El método de ajuste de las ecuaciones lineales y coplanares fotogramétricas de la aerotriangulación es realizado por mínimos cuadrados ordinarios (OLS) [Heipke, 1997, Aber et al., 2019], siendo este proceso reiterativo hasta que los RMSE radial y vertical del ajuste (con los puntos de control del ajuste) estuvieran por debajo del 1.5 m, que corresponde al máximo permitido por la especificación técnica vigente para el proceso de Aerotriangulación [IGAC, 2016b].

A cada bloque fotogramétrico se evalúa la exactitud posicional a partir del fotocontrol de validación utilizando el error medio cuadrático radial (ecuación 2-11) y vertical (ecuación 2-12) para la determinación de su uso de al menos para la escala 1:10.000 de acuerdo a los umbrales mencionados anteriormente [IGAC, 2016b], si no cumple esta condición se realiza nuevamente todo el proceso de aerotriangulación (desde el segundo proceso, correspondiente a orientación relativa del bloque fotogramétrico).

El último proceso asociado a la primera etapa del actual documento corresponde a la identificación y captura estereoscópica de los puntos de control desde los bloques fotogramétricos, que son utilizados en todos los experimentos realizados en los diferentes métodos y herramientas que permiten realizar la ortorrectificación. Tomando como información base la imagen fusionada, se procede con la identificación de los puntos de control, esto con el propósito de asegurar que a pesar de la temporalidad de los insumos, el elemento seleccionado en el bloque estuviera presente en la imagen VHR. El número y distribución [Shen et al., 2017] de los puntos de control se determina en función de cada una de las imágenes satelitales, es decir que se aseguraran por lo menos 25 puntos para el ajuste y 15 puntos para la validación del ajuste [Aguilar et al., 2007, Shen et al., 2017, Jannati and Valadan Zoej, 2015], en una distribución regular, extraídos de cada uno de los bloques fotogramétricos de la tabla 3-2.

Los puntos de control de la ortorrectificación son extraídos estereoscópicamente como puntos *tie* desde el módulo de medición de MATCH-AT a partir del ajuste seleccionado en el paso anterior del bloque fotogramétrico [Zhang et al., 2018]. Lo anterior es significativo realizarlo de esta forma, porque la determinación de las coordenadas de los puntos de control es resultado del proceso matemático del ajuste, además de que se posee información individualizada de la precisión del punto traducido en la desviación estándar en los ejes coordenados x , y y z [Aber et al., 2019].

3.4.2. Etapa 2 - Experimentos de Ororrectificación con mínimos cuadrados ordinarios (OLS)

La segunda etapa del actual documento corresponde a la realización y evaluación del proceso de ortorrectificación con mínimos cuadrados ordinarios (OLS) [Alizadeh Naeini et al., 2019, Cao, 2018, Jannati and Valadan Zoej, 2015, Li et al., 2018b] en los módulos especializados que ofrecen los tres programas más usados en el mercado (PCI, ERDAS y ENVI) a partir de las imágenes VHR procesadas de la tabla 3-4, los DEM caracterizados de la tabla 3-3 y los puntos de control extraídos de los bloques fotogramétricos de la tabla 3-2. Todos los procesos necesarios para realizar esta etapa se especifican en la figura 3-11. Los modelos evaluados corresponden al ajuste de los grados del modelo RFM (RPC0, RPC1, RPC2 y RPC3).

El primer proceso corresponde a la identificación de los módulos de ortorrectificación para realizar los experimentos y su evaluación, correspondientes a ERDAS Imagine (Versión 2015 - publicado en el 2014, Modulo *Transform & Orthocorrect*), ENVI (Versión 5.3 - publicado en diciembre de 2015, Modulo *RPC Orthorectification Workflow*) y PCI Geomatica (Versión 2016 - publicado en agosto de 2016, Modulo *OrthoEngine*), el último es el software más utilizado en las investigaciones consultadas [Zhang et al., 2016, Aguilar et al., 2012a, Aguilar et al., 2017].

El segundo proceso es la preparación de los insumos. Respecto a en este proceso se hace un señalamiento sobre la principal diferencia en cuestión de parámetros de los experimentos consultados en el capítulo 2, radica que como coordenada de terreno Z , es decir altura de los puntos de control, se toma el valor de la cota ortométrica del punto estereoscópico para el ajuste del modelo RFM. En las investigaciones previas la información de altura es extraída de acuerdo a la fuente de los puntos de control, por consiguiente si los puntos eran de tipo GNSS, la altura estaba disponible puesto que es parte de las coordenadas del punto de control [Aguilar et al., 2012a, Barazzetti et al., 2016, Cao, 2018, Hong et al., 2015, Jeong, 2017, Kurczyński et al., 2018, Moghaddam et al., 2018, Shen et al., 2017, Topan, 2013, Ye et al., 2017]. Mientras que las demás fuentes de puntos de control, obtienen la altura de un

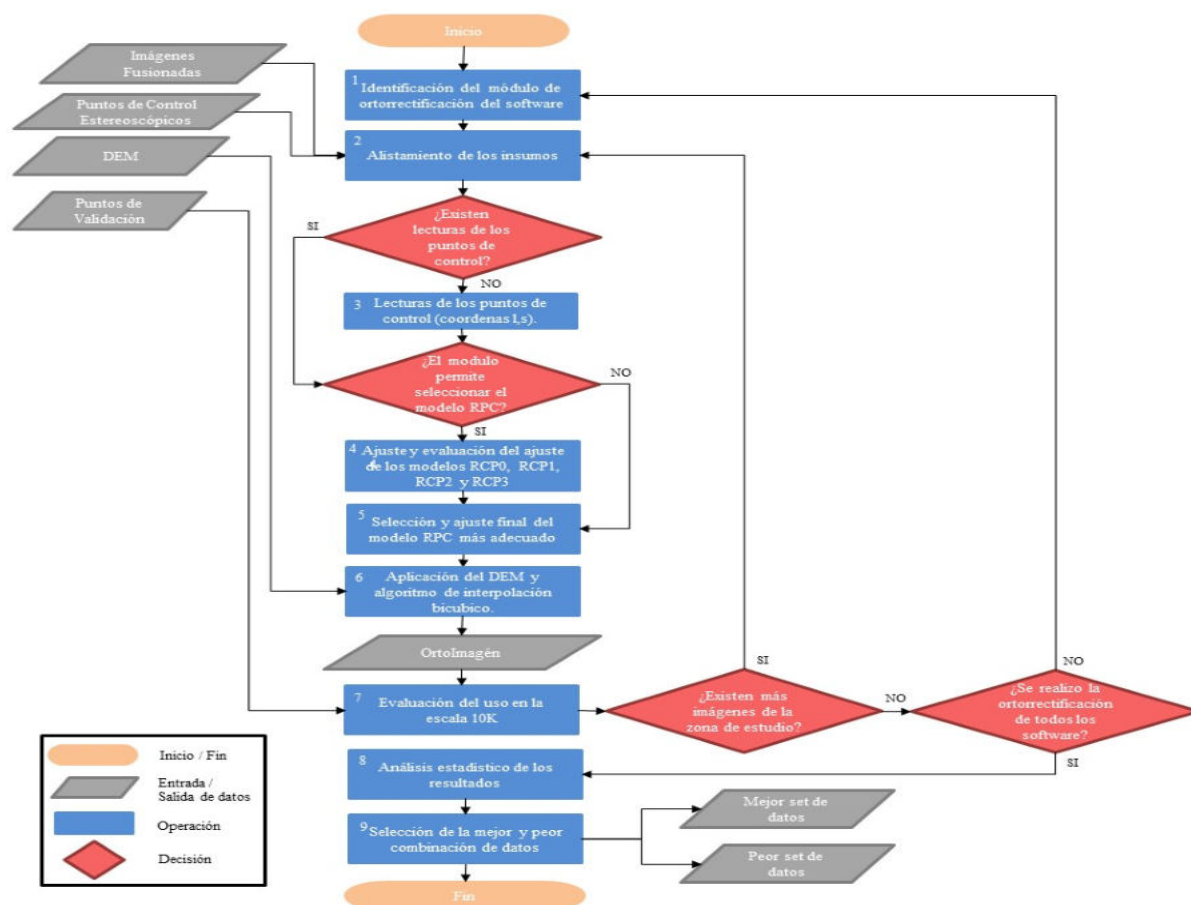


Figura 3-11.: Procesos de la segunda etapa de la investigación correspondiente a la realización y evaluación de los experimentos de ortorrectificación con mínimos cuadrados ordinarios (OLS) en distintos software.

producto adicional, existiendo la posibilidad de que fuera extraída directamente del DEM usado en la ortorrectificación [Aguilar et al., 2017, Li et al., 2018a] o por interpolación espacial a partir de vectores de cartografía urbana [Alizadeh Moghaddam et al., 2018, Moghaddam et al., 2018, Naeini et al., 2017]. Este proceso se realiza acorde a los requerimientos que posee cada uno de los software en relación al formato de imagen, puntos de control y tipo de proyecto que se debe crear en cada uno de ellos, para más detalle se debe consultar la documentación de soporte que posee cada uno de los módulos mencionados previamente.

El tercer proceso corresponde a la identificación de los puntos de control en las imágenes y sus correspondientes lecturas [Aguilar et al., 2012a] en concordancia a las coordenadas del espacio imagen (*line, sample*). Este proceso no es realizado si ya se posee esta información de un experimento previo.

El cuarto proceso corresponde a los procesos de ajuste y estimación de los RPC de las

imágenes tomando como información de referencia las coordenadas y altura de cada uno de los puntos estereoscópicos [Aguilar et al., 2017], siendo el ajuste de forma independiente para cada conjunto de puntos de cada uno de los bloques fotogramétricos. El ajuste surge de la selección de puntos de control que en número son entre 15 y 25 con una distribución regular [Shen et al., 2017], tomando como validación los puntos restantes fotoidentificables con el fin de escoger el grado del modelo RFM que mejor se ajusta.

El quinto proceso corresponde a la selección del grado más apropiado del modelo RFM y sus actividades se observan en la figura 3-12. Este proceso consiste en la identificación del experimento que contiene menor RMSE radial calculado a partir de los puntos de validación estereoscópicos y dichos valores se obtienen de forma automática por cada módulo, a excepción de ENVI el cual no permite conocer qué grado posee el modelo RFM ajustado. Los experimentos realizados en cada uno de los tres programas son utilizadas las mismas lecturas, con el fin de que los resultados sean comparables y no tengan alguna afectación por sesgo.

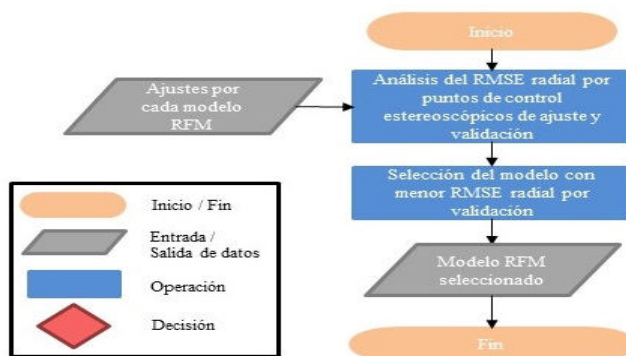


Figura 3-12.: Actividades asociadas al quinto proceso de la etapa 2 correspondiente a la selección del modelo RFM en cada experimento

El sexto proceso corresponde a la corrección por relieve a cada una de las imágenes VHR empleando de forma independiente cada uno los DEM [Alizadeh Naeini et al., 2019] disponibles para cada zona de estudio, a partir del modelo seleccionado previamente. En este proceso es aplicado como algoritmo de interpolación espacial al aplicar el DEM el método bicúbico [Saito and Miura, 2019], para de esta forma obtener la ortoimagen final.

El séptimo proceso corresponde a la evaluación y validación de la potencialidad que poseen las ortoimágenes en la generación de cartografía básica aplicando lo estipulado por la especificación técnica vigente [IGAC, 2020]. Para este proceso en la evaluación de la exactitud posicional se toma como umbral de aceptación del RMSE radial (ecuación 2-11) para escala 1:10.000 los productos que estén por debajo de 3 m, obtenido a partir de los puntos de control de validación de las figuras 3-5 y 3-6.

Los últimos procesos de la segunda etapa son realizados una vez sean finalizados los experimentos dispuestos en cada uno de los software. Estos procesos corresponden al análisis estadístico y gráfico que compara los RMSE radiales de cada uno de los experimentos en sus distintos escenarios con el propósito de seleccionar la combinación en cuestión de DEM y de fuente de puntos de control (bloque fotogramétrico) que mejor y peor comportamiento tuvieran independientemente del programa. Lo anterior tiene el objetivo de focalizar los resultados y el análisis de la última etapa de la investigación que corresponde al ajuste del modelo RFM con el algoritmo evolutivo PSO, en solo estos escenarios y utilizar las mismas lecturas para evaluar el ajuste resultado del uso de este algoritmo evolutivo.

3.4.3. Etapa 3 - Ortorrectificación con el algoritmo evolutivo PSO y validación de los resultados

La tercera y última etapa de la investigación presentada tiene como eje central la aplicación y evaluación del algoritmo evolutivo PSO acompañado en su función *fitness* con la técnica *Figure Conditional Analysis* (FCA) el cual a partir del DEM evalúa el ajuste del modelo RFM en la mayoría del área de la imagen y esto es realizado a partir del mejor y peor conjunto de datos (fuente de puntos de control y DEM) para cada imagen WV2 procedente de los experimentos OLS. La figura **3-13** contiene todos los procesos necesarios para la aplicación del PSO.

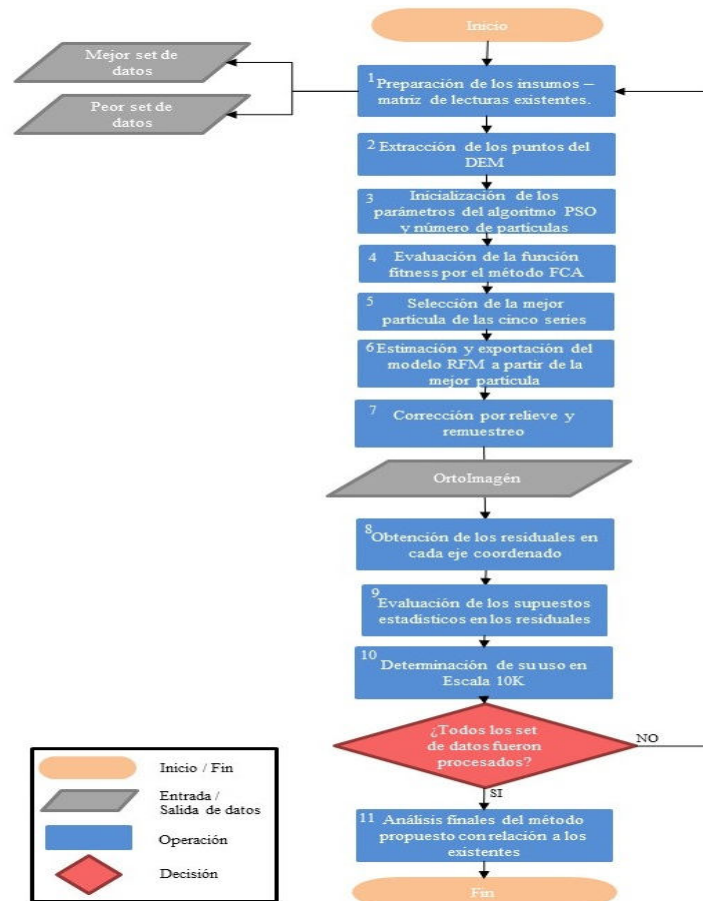


Figura 3-13.: Procesos de la tercera etapa correspondiente ortorrectificación con el algoritmo evolutivo PSO acompañado con la técnica FCA, con la correspondiente validación de los resultados finales.

La aplicación del algoritmo PSO es realizada en el software de matemático MATLAB R2020a (actualización 3 - abril de 2020) puesto que este ha sido utilizado en las investigaciones consultadas que aplican algoritmo evolutivos [Alizadeh Moghaddam et al., 2018, Yavari et al., 2013, Li et al., 2018a]. El profesor Alizadeh Moghaddam [Alizadeh Moghaddam et al., 2018] brindó orientación en la aplicación de este tipo de técnicas y facilitó sus *scripts* dada la petición que le realizó el autor de la investigación. Estos *scripts* contienen las funciones y flujo necesario para obtener la solución del modelo RFM de forma adecuada, por lo anterior como primer proceso a partir de los conjuntos de datos escogidos previamente y de las lecturas de coordenadas imagen provenientes de los experimentos con OLS, se genera la matriz de observaciones conforme a las consideraciones de formato del software utilizado.

El segundo proceso corresponde al establecimiento del número de puntos de acuerdo al área de la imagen y en función de la resolución espacial del DEM de la ortorrectificación para el uso del método FCA. En este proceso a diferencia de las investigaciones previas [Topan

and Kutoglu, 2009, Alizadeh Moghaddam et al., 2018] se utilizó como criterio que los puntos seleccionados correspondieran a una distribución regular con un espaciado de 35 veces el tamaño del píxel del DEM, con el propósito de poseer entre 600 y 800 puntos de validación para cada imagen. También, como indicador adicional se obtiene el RMSE radial del ajuste del modelo RPC2 a partir de los puntos de validación estereoscópicos, los mismos de los experimentos realizados con OLS.

El tercer proceso es la definición de los parámetros de las ecuaciones 2-4 y 2-7 del algoritmo PSO para todos los experimentos siguiendo el procedimiento estándar para el uso de este método que se describe en la figura 2-4 del capítulo 2. En la investigación se decidió emplear los mismos parámetros iniciales (tabla 3-5) utilizados en todas las investigaciones previas [Alizadeh Moghaddam et al., 2018, Yavari et al., 2013, Li et al., 2018a] que aplicaron el método PSO, debido a que por las características del algoritmo en un número reducido de iteraciones optimiza los parámetros [Venkateswarlu and Jujjavarapu, 2020].

Tabla 3-5.: Parámetros del algoritmo PSO aplicado. Fuente: [Alizadeh Moghaddam et al., 2018, Yavari et al., 2013, Li et al., 2018a]

v	v_{min}	-3
	v_{max}	3
	w_{min}	0.02
w	w_{max}	1
	t_{max}	200
c_1		1.5
c_2		1.5

Con relación con el número de partículas del algoritmo PSO, también conocido como tamaño de la población, este es establecido como 40, aumentando en 10 el número de candidatos establecidos por las investigaciones previas [Alizadeh Moghaddam et al., 2018, Yavari et al., 2013]. Respecto al número de iteraciones se estableció que son 200 y se repita todo el flujo cinco veces y seleccione la partícula que minimice en mayor grado a la función *fitness*, debido a las consideraciones de las diferencias en el resultado final que indicó Alizadeh et. al. [Alizadeh Moghaddam et al., 2018].

El cuarto proceso corresponde a la evaluación de la función *fitness* por el método FCA. Este proceso consiste en que la función *fitness* se complementa con la técnica FCA a partir de los puntos extraídos previamente del DEM. El FCA es seleccionado en lugar del RMSE radial de los puntos de validación estereoscópicos, debido a que ha demostrado mejores resultados porque realiza la evaluación de forma exhaustiva en la mayoría del área de la imagen y

por consiguiente no se limita solo a la calificación de las píxeles adyacentes a los puntos de validación [Topan and Kutoglu, 2009]. El quinto proceso es la selección de la mejor partícula a partir de las cinco iteraciones totales.

El sexto proceso corresponde a la estimación del modelo RFM de la mejor partícula y posteriormente a su exportación a un formato .RPB de forma manual bajo el estándar RPC00A [Helder et al., 2003]. El formato RPC00A contiene 20 coeficientes asociados a cada uno de los polinomios de la ecuación 2-1 para un total de ochenta. La equivalencia de los RPC de la ecuación 2-9 con el estándar RPC00A se encuentra especificada en la tabla **3-6**.

Tabla 3-6.: Equivalencia coeficientes del método propuesto con el estándar RPC00A

Coeficiente método propuesto	Coeficiente RPC00A
a_0	c_1
a_1	c_3
a_2	c_2
a_3	c_4
a_4	c_5
a_5	c_7
a_6	c_6
a_7	c_{10}
a_8	c_9
a_9	c_{11}
a_{10}	c_8

El séptimo proceso es la obtención de la ortoimagen final de cada una de las pruebas derivadas de PSO. Este proceso se realiza desde el software ERDAS en donde se utiliza como método de interpolación el bicúbico [Saito and Miura, 2019], buscando que fueran los mismos parámetros usados en los experimentos con OLS, con el propósito de poder realizar la comparación de los resultados de validación finales.

El octavo proceso corresponde a la obtención los residuales de los puntos de validación respecto a la ortoimagen final. Este proceso es significativo porque la validación de los resultados correspondiente a la evaluación de la exactitud posicional, toma como indicador (al igual que con los experimentos con OLS) al RMSE radial.

El noveno proceso es la determinación del cumplimiento de los supuestos estadísticos que recaen en los residuales de la ortoimagen con el control de validación. Para el supuesto de normalidad multivariante en los residuales de validación es utilizada la prueba de *Shapiro Wilk*

Generalizada [Liang et al., 2009]. Con el propósito de validar la homogeneidad en las varianzas de los componentes x y y de los residuales se realiza la prueba estadística no paramétrica de *Fligner-Killeen* ya que es menos sensible al asumir que los residuales siguen una distribución normal [Correa et al., 2006]. Por último para indicar la existencia de independencia lineal entre los residuales en los ejes x y y se realizó la prueba de correlación de *Pearson* [Artusi et al., 2002].

Como procesos finales, sin importar el no cumplimiento de los supuestos estadísticos que imposibilita aplicar el estándar NSSDA y en consecuencia la especificación técnica colombiana, se determina si las ortoimágenes son adecuadas para escala 1:10.000 a partir del RMSE radial como lo establece la especificación técnica vigente y se compara con los mejores resultados que reporta los experimentos con OLS con los mismos conjunto de datos, tomando como umbral de aceptación 3 m.

4. Resultados

El capítulo 4 esta organizado en tres sesiones que corresponden a las tres etapas del flujo metodológico presentado en el capítulo 3 de forma respectiva: (i) la primera sesión corresponde al procesamiento y preparación de la información necesaria para los experimentos de ortorrectificación, (ii) la segunda sesión presenta y caracteriza los experimentos realizados con mínimos cuadrados ordinarios (OLS, por sus siglas en inglés) de ortorrectificación en los software de PCI, ERDAS y ENVI; y la (iii) tercera describe, evalúa y compara los resultados de ortorrectificación al aplicar PSO.

4.1. Preparación y caracterización de insumos necesarios para la ortorrectificación

4.1.1. Caracterización DEM

La caracterización de los DEM se ocupa de su preparación y validación evaluando el RMSE vertical (ecuación 2-12) de acuerdo con lo establecido por la especificación técnica vigente en Colombia para cartografía básica [IGAC, 2020]. Para la zona de Valledupar la evaluación surgió a partir de 127 puntos de control y en la zona de sabana centro y el Guavio correspondió a 92 puntos, todos estos corresponden al total de los puntos de control disponibles para el proyecto de investigación. La tabla 4-1 muestra los resultados de la validación.

Tabla 4-1.: Resultados evaluación DEM

DEM	$RMSE_{ORT}$ (m)	$RMSE_{ELIP}$ (m)	Número Puntos
ALOS/VALLEDUPAR	3.847	3.039	127
TREX/VALLEDUPAR	5.032	5.049	127
SRTM/VALLEDUPAR	5.729	6.026	127
ALOS/SABANA Y GUAVIO	24.342	5.101	92
SRTM/SABANA Y GUAVIO	8.140	23.199	92
RESTITUCIÓN/SABANA Y GUAVIO	3.505	24.379	82

$RMSE_{ORT}$ se refiere al error medio cuadrático vertical obtenido a partir de las alturas ortométricas de los puntos de control y $RMSE_{ELIP}$ se refiere al error medio cuadrático vertical obtenido a partir de las alturas elipsoidales de los puntos de control

Conforme a los resultados de los RMSE verticales de la tabla 4-1 que es derivado de los residuales del anexo A, hay que destacar la relación directa que existen entre los RMSE de alturas ortométricas y elipsoidales, esto se debe al comportamiento promedio de la ondulación geoidal de cada zona de estudio, puesto que la zona de Valledupar posee una ondulación media de 2 m mientras la zona sabana centro y el Guavio de 25 m, de acuerdo al sistema vertical GEOCOL2004 [IGAC, 2005].

Por lo anterior, se determinó que el modelo ALOS/PALSAR posee altura elipsoidal mientras que los demás describen alturas ortométricas. Debido a que los RMSE verticales de los DEM ALOS/PALSAR de las alturas elipsoidales en las dos zonas de estudio fluctúan entre 3 y 5 m, mientras que los RMSE verticales de las alturas ortométricas corresponden a los valores medios de ondulación geoidal de cada una de las zonas de estudio.

Teniendo en cuenta que el RMSE vertical para las alturas ortométricas aceptado es de 3 m, según la especificación técnica vigente, ningún DEM es apropiado, sin embargo, el producto que se acerca más a este valor es el de DEM ALOS/PALSAR de la zona de Valledupar. Además otro criterio que de partida provoca que la mayoría de los DEM estudiados no sean adecuados para la escala 1:10.000 (solo cumple el DEM de Restitución), es que no cumplen el criterio de espaciado máximo de grilla atribuido a un tamaño de píxel de menor de 10 m.

Se aclara que a pesar de que los DEM no cumplen con la especificación técnica fueron utilizados en las condiciones expuestas en todos los experimentos de ortorrectificación realizados, debido a que son los únicos insumos disponibles utilizables para el proceso mencionado.

4.1.2. Bloques Fotogramétricos

Es de interés el análisis de los resultados de la aerotriangulación de los bloques fotogramétricos especificados en la tabla 3-2, puesto que asegura que los puntos estereoscópicos provenientes de esta fuente de información posean una exactitud adecuada. El valor aceptado de RMSE radial y vertical para escala 1:10.000 es de 1.5 m respectivamente, mientras que en los componentes x y y corresponde a 1.06 m [IGAC, 2016b]. Por consiguiente, en la tabla 4-2 se especifican los RMSE por cada componente producto de la orientación relativa, en donde se evidencia que se cumplen los umbrales, acercándose sensiblemente los correspondientes los resultados del bloque VLL04R.

Tabla 4-2.: Errores medios cuadráticos de la orientación relativa de los bloques fotogramétricos.

Bloque Fotogramétrico	Área (ha)	$RMSE_x$ (m)	$RMSE_y$ (m)	$RMSE_z$ (m)
G10	216058.287	0.445	0.343	1.313
G16	66594.092	0.333	0.429	1.187
VLL06	9702.515	0.423	0.161	2.586
VLL04R	265703.061	1.050	1.054	1.445
VLL08	11012.481	0.178	0.118	0.829
VLL14	27139.453	0.089	0.086	1.409

En cuestión de la evaluación de la exactitud posicional u orientación absoluta de los bloques fotogramétricos de acuerdo a la especificación técnica vigente del proceso de aerotriangulación [IGAC, 2016b] el valor aceptado para escala 1:10.000 tanto para en el error medio cuadrático horizontal y vertical es de 1.5 m. La evaluación de la exactitud posicional fue realizada tanto con los puntos de control del ajuste como los de validación del proyecto, como se observa en la tabla 4-3 y esta misma resume los residuales producto de los procesos de evaluación que se encuentran consignados en el anexo B.

Tabla 4-3.: Errores medios cuadráticos radiales de la orientación absoluta de los bloques fotogramétricos.

Bloque Fotogramétrico	$RMSE_r$ ajus.(m)	$RMSE_z$ ajus.(m)	Ptos ajus.	$RMSE_r$ val.(m)	$RMSE_z$ val.(m)	Ptos val.
G10	0.561	0.341	36	0.382	0.245	36
G16	0.502	0.249	19	0.51	0.172	32
VLL06	0.295	0.297	44	0.268	0.231	7
VLL04R	0.490	0.90	50	0.761	0.628	44
VLL08	0.274	0.298	17	0.284	0.268	25
VLL14	0.290	0.221	21	0.279	0.196	28

Ptos ajus. hace referencia al número de puntos de control utilizados en el ajuste del bloque fotogramétrico y Ptos val. hace referencia al número de puntos de control utilizados para la validación de la exactitud posicional del bloque fotogramétrico

Con relación al ajuste de los bloques fotogramétricos se evidencia que sin importar el tipo de fotografía y GSD fueron obtenidos RMSE radiales y verticales apropiados para la escala 1:10.000, de hecho muy por debajo del umbral, acercándose su uso para escala 1:5.000 (excepto para el bloque VLL04R). Además de que esta métrica se comportó de forma directa de acuerdo con el valor de GSD promedio del bloque fotogramétrico.

4.1.3. Puntos estereoscópicos extraídos de los bloques fotogramétricos

En la tabla 4-4 se relacionan el número de puntos estereoscópicos extraídos de cada uno de los bloques fotogramétricos y se caracteriza con la desviación estándar media en cada componente junto a la absoluta, la cual fue calculada a partir de los RMSE radial y vertical correspondientes al proceso de validación presentados en la tabla 4-3, cada uno de los puntos estereoscópicos posee una descripción que tiene el propósito de indicar la ubicación del detalle seleccionado en la fotografía aérea y un ejemplo de esto es la figura 4-1. La información detallada de las coordenadas y descripciones de los puntos capturados se encuentran disponibles en los anexos C, D, E, F, G y H.

Tabla 4-4.: Caracterización de los puntos estereoscópicos de los bloques fotogramétricos.

Bloque Fotogramétrico	Total Ptos	\bar{x} de s_x aj. (m)	\bar{x} de s_y aj. (m)	\bar{x} de s_z aj. (m)	\bar{x} de s_{radial} abs. (m)	\bar{x} de s_z abs. (m)
G10	98	0.030	0.029	0.132	0.384	0.281
G16	65	0.022	0.021	0.087	0.513	0.195
VLL06	57	0.067	0.062	0.137	0.285	0.273
VLL04R	60	0.216	0.208	0.475	0.822	0.796
VLL08	62	0.023	0.021	0.101	0.286	0.289
VLL14	66	0.014	0.014	0.075	0.280	0.211

En términos generales los puntos estereoscópicos de acuerdo a la tabla 4-4 cumplen en su mayoría con la exactitud posicional necesaria, es decir esta característica es menor al tamaño del píxel [Toutin, 2004] que para la investigación presentada es de 0.5 m, observándose que solamente en promedio no cumplen esta característica los puntos provenientes de los bloques VLL04R y G16. Por otro lado, debido a que tanto la exactitud posicional horizontal y radial son menores a 1/3 de la exactitud buscada (3 m) [Ariza-López et al., 2018], estos puntos también pueden ser empleados para la validación de ortoimágenes escala 1:10.000.

4.2. Evaluación de la ortorrectificación por mínimos cuadrados ordinarios

Esta etapa de la investigación proporcionó los siguientes resultados: (i) ajustes candidatos aplicando mínimos cuadrados ordinarios (OLS) al modelo RFM de cada una de las imágenes de la tabla 3-4 y (ii) la selección del modelo RFM óptimo con su correspondiente validación, para ello fueron utilizados los puntos estereoscópicos extraídos de los bloques fotogramétricos

4.2 Evaluación de la ortorrectificación por mínimos cuadrados ordinario 59

ORT08VU-14	
Imagen de Referencia	
Imagen Detallada	
Este	1088283.020
Norte	1652278.915
Cota	216.483
Sistema de Referencia	MAGNA CENTRAL – EPOCA 2018.0 – GEOCOL 2004

Figura 4-1.: Ejemplo de descripción de un punto estereoscópico

de la tabla 4-4 y el fotocontrol de validación del proyecto.

En total fueron realizados 90 experimentos, debido a la combinación generada de los insumos en cuestión de imágenes (tabla 3-4), DEM (tabla 3-3) y fuente de puntos estereoscópicos (tabla 4-4), por lo que para la zona de Valledupar se realizaron 24 experimentos y en las zonas de sabana centro y el Guavio fueron 6, estos para cada uno de los tres software.

Los experimentos fueron ejecutados en los software especializados de procesamiento de imágenes de PCI, ERDAS y ENVI con las lecturas imagen del anexo I (si desea consultar los resultados de forma detallada de cada uno de las pruebas mencionadas pueden dirigirse a los anexos J, K y L).

4.2.1. Evaluación del ajuste del modelo RFM

Para PCI se evaluaron los modelos RPC0, RPC1 y RPC2, mientras que en ERDAS adicionalmente fue evaluado el RPC3 y en ENVI se desconoce el grado del modelo RFM, pero en lugar de esto se evidenció que el ajuste es influenciado por el DEM utilizado. El RMSE radial reportado de los mejores experimentos de las tablas 4-5, 4-6 y 4-7 correspondió al

calculado con los puntos de ajuste y los restantes que funcionaron como de validación inicial para la selección del modelo RFM más óptimo (ERDAS no permitió conocer el RMSE radial calculado a partir de los puntos estereoscópicos de validación), este proceso fue realizado de forma independiente para cada una de las imágenes y de forma detallada se encuentran los resultados en los anexos J, K y L.

Tabla 4-5.: Mejores ajustes del modelo RFM con mínimos cuadrados realizados para la imagen WV2 2010.

Fuente	PCI		ERDAS		ENVI		# Ptos aj.	# Ptos val.		
	Modelo	$RMSE_r$	Modelo	$RMSE_r$	DEM	$RMSE_r$			$RMSE_r$	
	aj. (m)	val.(m)	aj. (m)		aj. (m)	val.(m)				
VLL04R	RPC2	1.617	1.471	RPC3	0.451	ALOS	1.610	1.390	15	13
VLL06	RPC2	0.548	0.826	RPC3	4.326	ALOS	0.930	1.060	18	8
VLL08	RPC2	0.845	0.779	RPC3	1.212	TREX	0.820	0.920	21	27
VLL14	RPC2	0.520	0.796	RPC3	1.917	TREX	1.350	1.430	15	20

Tabla 4-6.: Mejores ajustes del modelo RFM con mínimos cuadrados realizados para la imagen WV2 2014.

Fuente	PCI		ERDAS		ENVI		# Ptos aj.	# Ptos val.		
	Modelo	$RMSE_r$	Modelo	$RMSE_r$	MDT	$RMSE_r$			$RMSE_r$	
	aj. (m)	val.(m)	aj. (m)		aj. (m)	val.(m)				
VLL04R	RPC2	1.617	2.490	RPC3	3.532	ALOS	4.200	1.830	17	12
VLL06	RPC1	0.971	1.261	RPC3	4.646	TREX	1.680	0.910	9	11
VLL08	RPC2	2.313	2.313	RPC3	1.873	TREX	1.350	1.350	16	12
VLL14	RPC2	1.110	1.581	RPC3	3.343	TREX	2.290	1.360	16	19

Tabla 4-7.: Mejores ajustes del modelo RFM con mínimos cuadrados realizados para la imagen WV2 2011.

Fuente	PCI		ERDAS		ENVI		# Ptos aj.	# Ptos val.		
	Modelo	$RMSE_r$	Modelo	$RMSE_r$	MDT	$RMSE_r$			$RMSE_r$	
	aj. (m)	val.(m)	aj. (m)		aj. (m)	val.(m)				
G10	RPC2	1.252	1.476	RPC3	1.393	REST	2.430	1.090	12	15
G16	RPC2	2.299	1.614	RPC3	1.615	REST	2.810	1.210	14	17

Por lo tanto, de acuerdo a los resultados para las tres imágenes en las tablas 4-5, 4-6 y 4-7 se encontró un modelo apropiado sin importar la fuente de los puntos y las condiciones particulares de la imagen para cada uno de los software, a excepción de ENVI. Por lo tanto para PCI el modelo más apropiado es el RPC2 y en ERDAS es el RPC3, mientras que la

interpretación en ENVI el ajuste esta influenciado con el DEM.

Para ENVI se observó que en todos de los casos el DEM SRTM no arrojó resultados apropiados en las dos zonas de estudio, siendo predominante mejores resultados con DEM producto de procesos semiautomáticos (Como Restitución y TREx). Mientras que en cuanto al número de puntos de control para el ajuste del modelo RFM, osciló en el rango observado en la revisión de la literatura presentado en el capítulo 2 (Ver tabla 2-1).

4.2.2. Validación del ajuste del modelo RFM y distintos MDT a partir del fotocontrol de validación

A cada uno de los ajustes seleccionados de las tablas 4-5, 4-6 y 4-5 se realizó la corrección del relieve empleando los DEM disponibles de cada zona de estudio con el propósito de obtener la ortoimagen final, los resultados son reportados en las tablas 4-8, 4-9 y 4-10 correspondiendo al RMSE radial (ecuación 2-11) calculado a partir de los puntos de control de validación.

Tabla 4-8.: RMSE radial de validación de los ajustes del modelo RFM con mínimos cuadrados ordinarios realizados para la imagen WV2 2010.

Fuente	PCI			ERDAS			ENVI		
	ALOS	SRTM	TREx	ALOS	SRTM	TREx	ALOS	SRTM	TREx
	$RMSE_r$	$RMSE_r$	$RMSE_r$	$RMSE_r$	$RMSE_r$	$RMSE_r$	$RMSE_r$	$RMSE_r$	$RMSE_r$
	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)
VLL04R	0.6702	0.9118	0.5371	7.0295	6.4664	7.7365	0.8594	1.0429	0.9101
VLL06	0.5522	0.6206	0.5479	3.1284	2.7740	3.1266	0.7913	0.9539	0.8959
VLL08	0.6522	0.8224	0.6995	0.8102	1.1802	0.8346	0.7213	1.1477	0.7544
VLL14	0.6896	0.7340	0.5821	1.3034	1.0061	1.3554	0.6653	0.8703	0.6202

La imagen WV2 2010 la cuál posee las condiciones más adecuadas en comparación a las demás utilizadas, de acuerdo a la tabla 4-8 con los insumos de la investigación y la mayoría de los programas estudiados pueden ser utilizadas para la producción cartográfica básica de escala 1:10.000. De forma complementaria con el fin de evaluar la exactitud de la fuente y el resultado de acuerdo al software utilizado, a partir de los valores medianos obtenidos de la ponderación con estos dos factores de la tabla 4-8 sin variar el DEM fueron generadas las figuras 4-2 y 4-3 respectivamente.

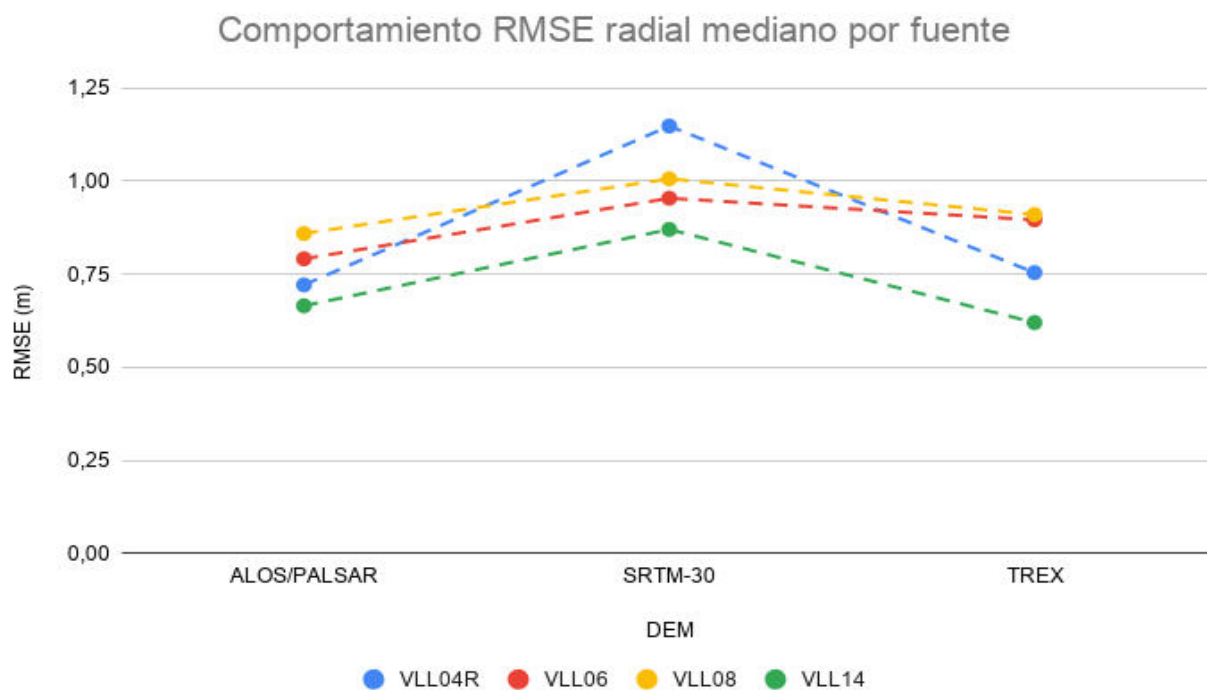


Figura 4-2.: Comportamiento de las fuentes de los puntos de control de acuerdo al DEM empleado sin importar el software en el resultado de la ortorrectificación de la imagen WV2 2010

La figura 4-2 indica que las mejores fuentes correspondieron a los puntos provenientes de los bloques fotogramétricos VLL14 y VLL06 mientras que el que posee comportamiento menos adecuado corresponde a VLL04R. Por otro lado, los DEM que mejor comportamiento presentaron son el ALOS y TREX mientras que el SRTM no posee un buen comportamiento. Esto quiere decir que la mejor combinación de datos puede ser puntos extraídos de los bloques VLL06 y VLL14 junto al modelo TREX y ALOS.

4.2 Evaluación de la ortorrectificación por mínimos cuadrados ordinario 63

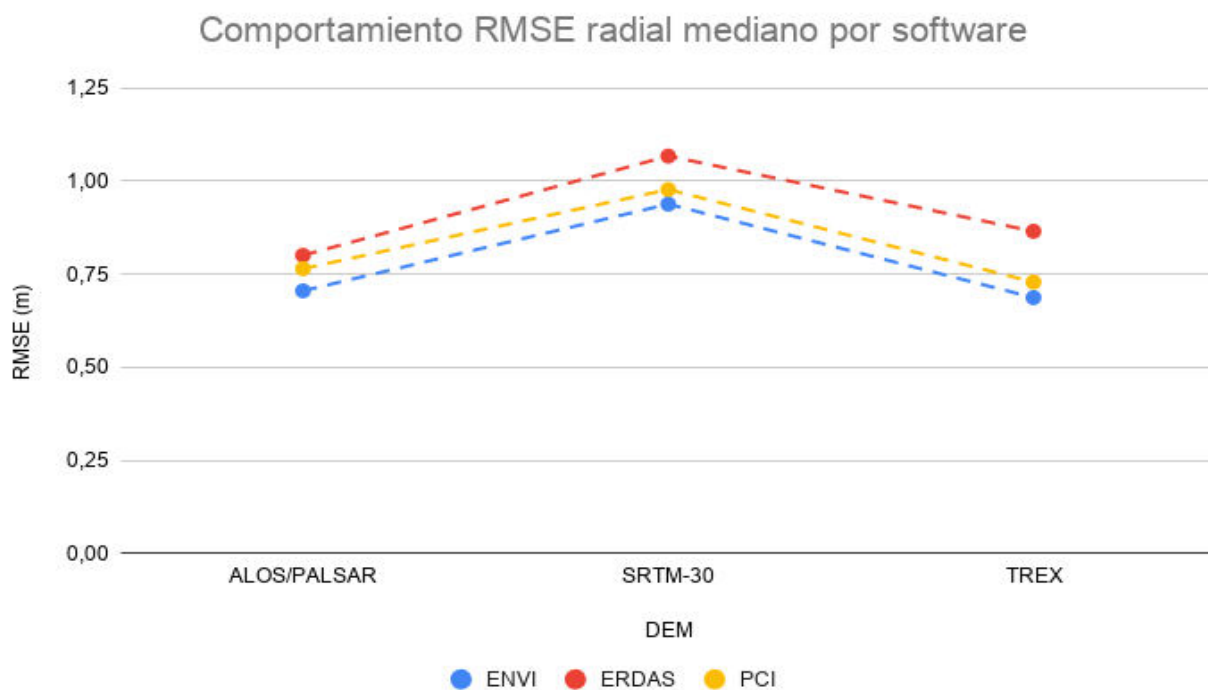


Figura 4-3.: Comportamiento del software de acuerdo al DEM empleado sin importar la fuente de puntos de control en el resultado de la ortorrectificación de la imagen WV2 2010

Para la imagen WV2 2010, la figura 4-3 muestra que los tres software reportan comportamientos similares en un rango de oscilación de tamaño de 0.2 m, no obstante los que presentaron un mejor comportamiento independientemente del DEM son PCI y ENVI. Mientras que en cuestión de DEM se observó el mismo comportamiento evidenciado en la figura 4-2.

Por lo anterior se seleccionó como mejor escenario la combinación VLL06/TREX y peor escenario a VLL04R/SRTM, tomando de referencia solamente los valores de PCI (ya que ofrece mejores resultados) y lo evidenciado en las dos figuras presentadas previamente.

A continuación se muestran los resultados para la imagen WV2 2014 correspondiente a la tabla 4-9 junto a las figuras 4-4 y 4-5.

Tabla 4-9.: RMSE radial de validación de los ajustes del modelo RFM con mínimos cuadrados ordinarios realizados para la imagen WV2 2014.

Fuente	PCI			ERDAS			ENVI		
	ALOS	SRTM	TREx	ALOS	SRTM	TREx	ALOS	SRTM	TREx
	$RMSE_r$	$RMSE_r$	$RMSE_r$	$RMSE_r$	$RMSE_r$	$RMSE_r$	$RMSE_r$	$RMSE_r$	$RMSE_r$
	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)
VLL04R	1.7392	1.9969	1.3330	2.9462	2.3643	2.2566	1.9790	1.8055	1.5218
VLL06	1.7258	1.8189	1.1941	8.7588	8.9840	9.9612	1.7636	2.2755	1.4051
VLL08	1.7686	1.7838	1.1729	3.4583	3.2100	3.4877	1.8817	1.9822	1.7017
VLL14	2.1446	1.6864	1.7753	2.2125	2.1081	1.5977	2.2196	1.7306	1.6217

La imagen WV2 2014 posee un ángulo de incidencia mayor a 18° y se encuentra en una zona de alta pendiente, por consiguiente es lógico que presente RMSE radiales más altos que la imagen WV2 2010, haciendo esta observación debido a que las dos imágenes corresponden a la zona de estudio de Valledupar. No obstante, se observa que en la mayoría de los ajustes la ortoimagen cumple los requisitos para escala 1:10.000 con excepción de los experimentos realizados con ERDAS en donde se concentran los resultados que no cumplieron (siendo conformes para la escala 1:25.000) mientras que los que si cumplieron con este software se acercan sensiblemente al umbral permitido. Para el análisis de fuente y software fueron generadas las figuras 4-4 y 4-5 que muestran el comportamiento del valor mediano de los RMSE radiales calculados.

4.2 Evaluación de la ortorrectificación por mínimos cuadrados ordinario 65

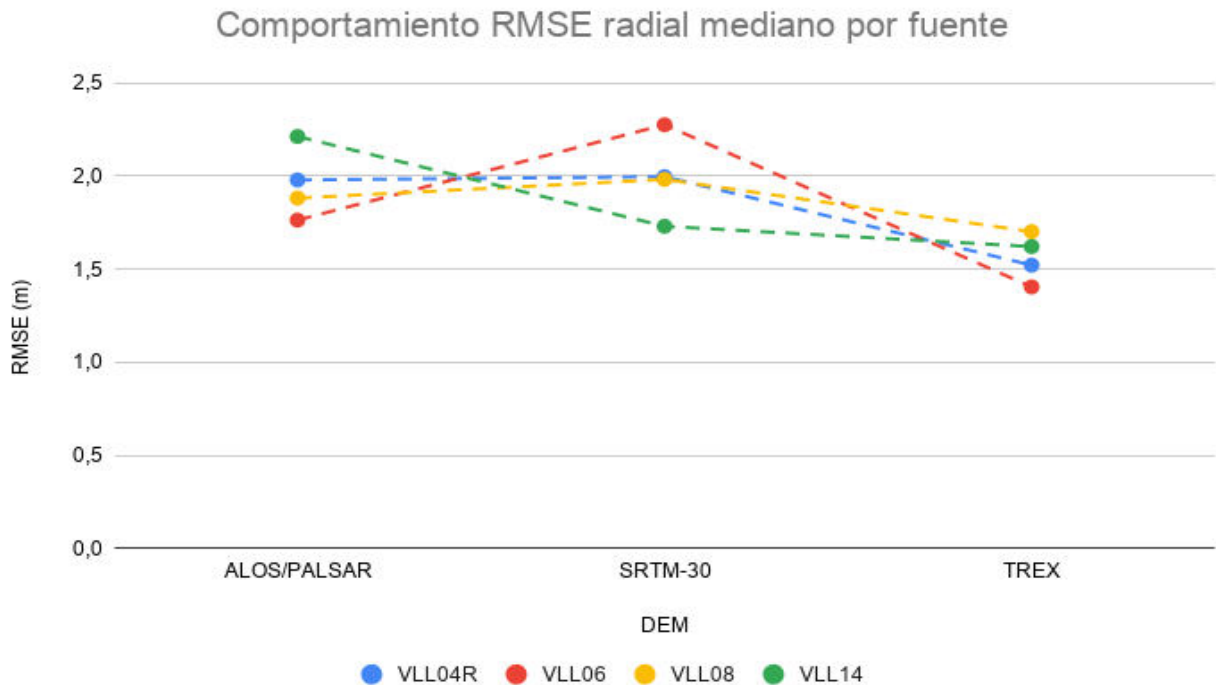


Figura 4-4.: Comportamiento de las fuentes de los puntos de control de acuerdo al DEM empleado sin importar el software en el resultado de la ortorrectificación de la imagen WV2 2014

Con relación a las fuentes de puntos de control empleadas en la ortorrectificación de la imagen WV2 2014, la figura 4-4 indica que la fuente es afectada considerablemente por el DEM, se demuestra por ejemplo en que los puntos provenientes del bloque VLL06 tuvieron un ajuste adecuado con el DEM ALOS mientras que con el SRTM fue el menos apropiado. Por lo que de la gráfica se puede indicar que las únicas fuentes que fueron consistentes correspondieron a VLL14 y VLL08. En cuestión de DEM, ALOS y SRTM tuvieron comportamientos similares los cuales se acercan a los 2 m mientras que TREX tuvo un mejor comportamiento.

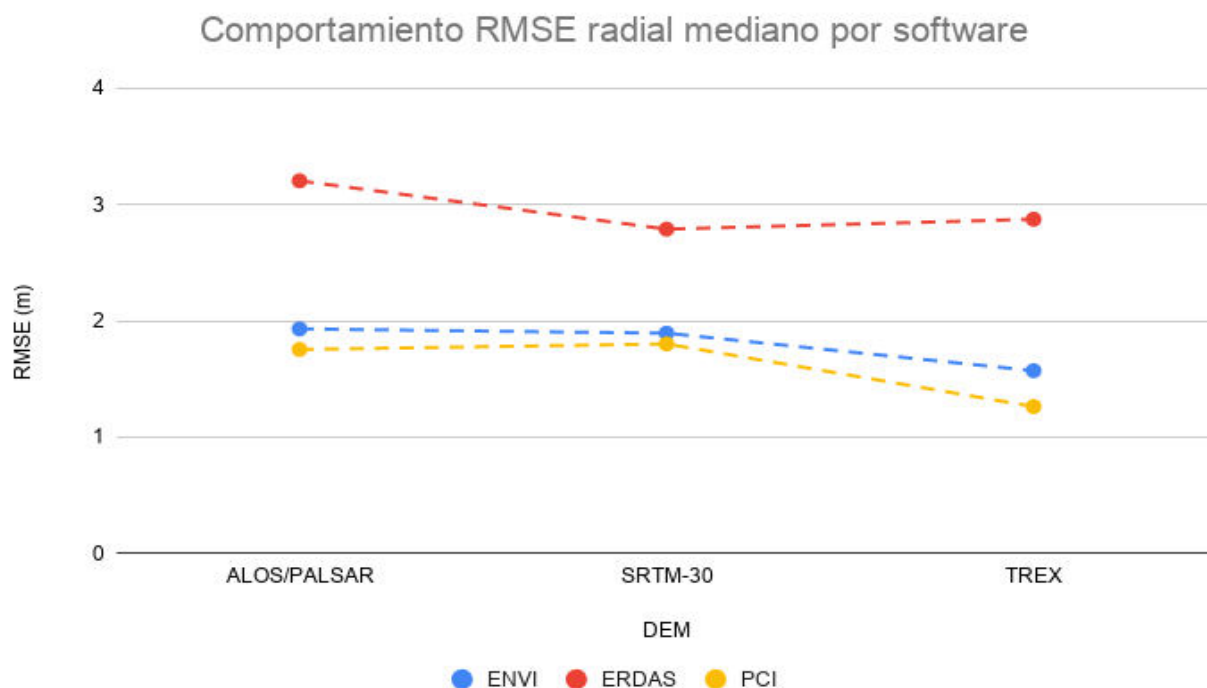


Figura 4-5.: Comportamiento del software de acuerdo al DEM empleado sin importar la fuente de puntos de control en el resultado de la ortorrectificación de la imagen WV2 2014

La figura 4-5 indica que en definitiva que ERDAS no fue un software adecuado para este tipo de imágenes puesto que fluctúa estos valores en 3 m que corresponde al umbral de aceptación para escala 1:10.000, no obstante persiste el comportamiento evidenciado en PCI y ENVI para la imagen WV2 2010. Mientras que en cuestión de DEM se observó el mismo comportamiento evidenciado en la figura 4-4, con lo cual se decide que el más adecuado para la zona de estudio fue TREX. Por lo tanto, como mejor combinación se seleccionó a VLL14/ALOS y como peor escenario a VLL04R/TREX, dado su comportamiento en solo el software PCI (el cual posee el mejor comportamiento).

Como resultado final de esta sección se muestra los resultados obtenidos con la imagen WV2 2011 en las tablas 4-10 junto a las figuras 4-6 y 4-7.

4.2 Evaluación de la ortorrectificación por mínimos cuadrados ordinario 67

Tabla 4-10.: RMSE radial de validación de los ajustes del modelo RFM con mínimos cuadrados ordinarios realizados para la imagen WV2 2011.

Fuente	PCI			ERDAS			ENVI		
	ALOS	REST	SRTM	ALOS	REST	SRTM	ALOS	REST	SRTM
	$RMSE_r$	$RMSE_r$	$RMSE_r$	$RMSE_r$	$RMSE_r$	$RMSE_r$	$RMSE_r$	$RMSE_r$	$RMSE_r$
	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)
G10	13.7551	2.3761	1.8045	14.4539	9.5866	8.5437	836.4093	833.2705	833.2817
G16	13.1597	2.5853	3.2366	12.7691	2.9875	3.1176	836.2545	832.5941	832.8276

La única imagen de la zona de sabana centro y Guavio corresponde a la imagen WV2 2010 y esta particularmente posee las mismas características de la imagen anterior en cuestión de ángulo de incidencia y topografía de la zona, no obstante los resultados no fueron adecuados en la mayoría de los experimentos, cumpliendo solamente para los realizados con el DEM de REST en PCI y ERDAS. Las pruebas realizadas en ENVI presentaron considerablemente errores elevados cercanos a 830 m, a pesar de que fueron repetidos cinco veces. Por otro lado, los resultados con el DEM ALOS demuestra que la exactitud posicional de la ortoimagen final esta directamente influenciada por la naturaleza de las alturas que representa, puesto que previamente se señaló que este DEM posee alturas elipsoidales y esto provocó que la inexactitud del DEM respecto a las alturas ortométricas de los puntos de control correspondiera a la ondulación geoidal (No fue realizada una transformación a alturas ortométricas, debido a la inexistencia de dicho método para este tipo de productos al sistema de referencia vertical GEOCOL2004). Para el análisis de fuente y software fueron generadas las figuras 4-6 y 4-7 que muestran el comportamiento del valor mediano de los RMSE radiales calculados.

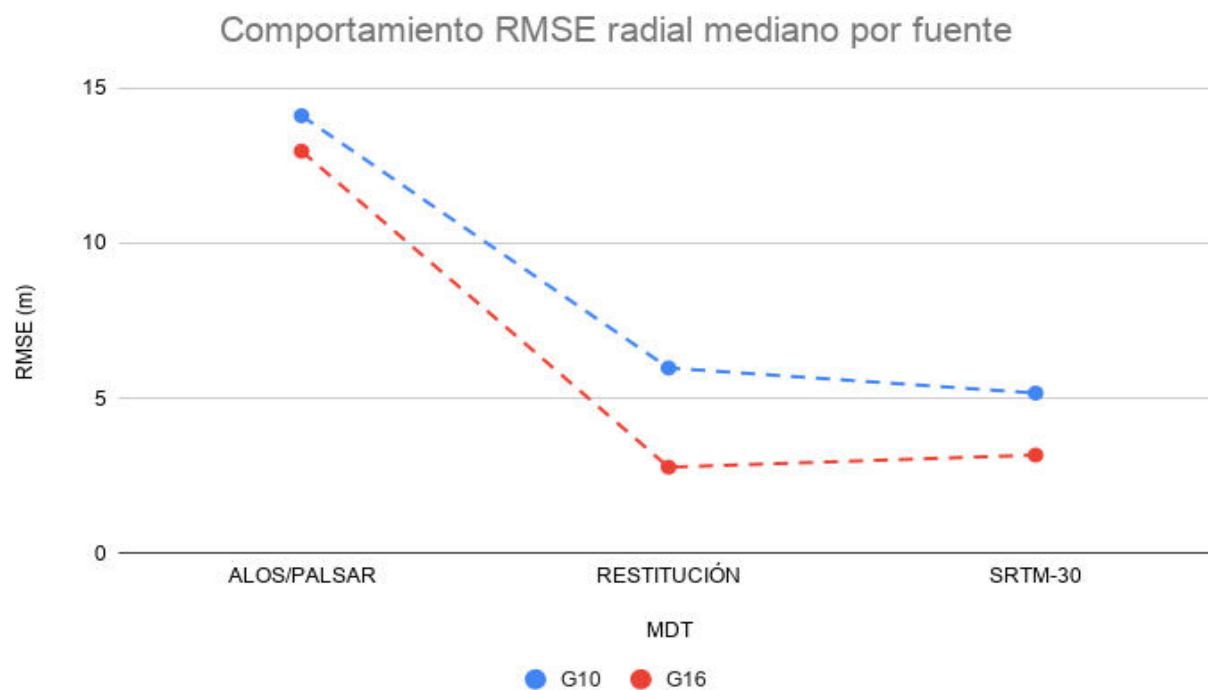


Figura 4-6.: Comportamiento de las fuentes de los puntos de control de acuerdo al DEM empleado sin importar el software en el resultado de la ortorrectificación de la imagen WV2 2011

La figura 4-6 fue generada sin incluir los resultados de ENVI, por lo tanto se indica que la fuente más adecuada para la ortorrectificación de la imagen WV2 es el bloque G16 para PCI y ERDAS para cumplir la exactitud posicional exigida para la escala 1:10.000. Mientras que los DEM de REST y SRTM poseen errores medios cuadráticos cercanos, esto quiere decir que con cualquiera de los dos se puede lograr la obtención de ortoimágenes útiles para la escala 1:10.000 con la imagen WV2 2010. Por otro lado, debido a la característica a que el DEM ALOS posee alturas elipsoidales, este fue el que peores resultados presento incluso no conformes para la escala 1:25.000. Por consiguiente se seleccionó como mejor conjunto de datos G16/SRTM y como peor escenario G10/SRTM.

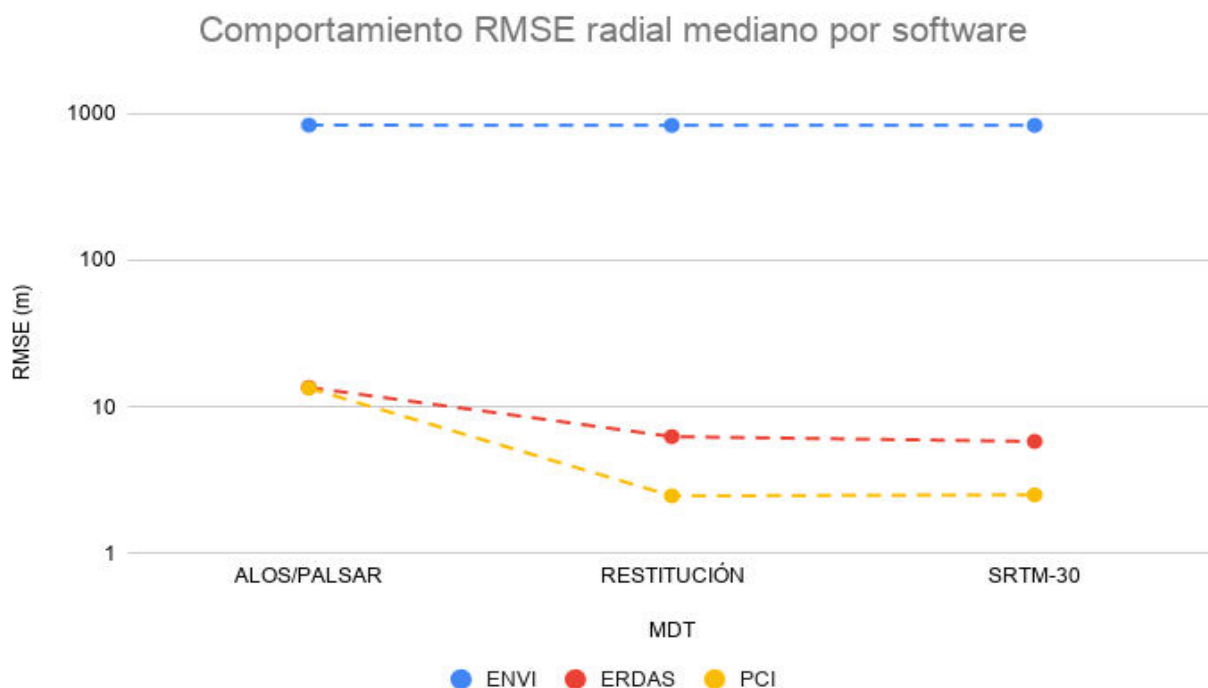


Figura 4-7.: Comportamiento del software de acuerdo al DEM empleado sin importar la fuente de puntos de control en el resultado de la orrorrectificación de la imagen WV2 2011

Por último, la figura 4-7 fue generada en escala logarítmica para visualizar el comportamiento de los tres software, siendo evidente que ENVI y en menor medida ERDAS no fueron adecuados, mientras que PCI tuvo comportamientos similares con los DEM REST y SRTM.

4.3. Ortorrectificación obtenida a partir de PSO

Esta sección corresponde a la presentación de los resultados obtenidos en la orrorrectificación obtenida usando el algoritmo evolutivo PSO al modelo RFM, a partir de los conjunto de datos con mejor y peor comportamiento para cada imagen seleccionados en la sección anterior correspondiente a los experimentos realizados con OLS.

A continuación, la información presentada corresponden al análisis y comparación de los resultados con los reportados con OLS junto a la validación y determinación si las imágenes son aptas para la generación de cartografía básica de escala 1:10.000.

4.3.1. Modelos RFM estimados a partir de PSO

La tabla 4-11 contiene los resultados que se obtuvo con cada conjunto de datos e imagen a partir de las lecturas de coordenadas imagen (l, s) de los puntos de control estereoscópicos que corresponden al anexo I.

Tabla 4-11.: Resultados del ajuste del modelo RFM de la imágenes de estudio aplicando PSO y FCA.

Imagen	Conjunto de datos	RPC óptimos	RMSE radial ajus.(m)	RMSE radial val.(m)	RMSE FCA (m)	Puntos DEM	Tiempo (s)
WV2 2010	VLL04R SRTM	$a_{1,1}, a_{1,2}, a_{1,3},$ $a_{3,1}, a_{3,2}, a_{3,3},$ $a_{3,5}$	9.541	10.847	1119.841	698	1061.502
WV2 2010	VLL06 TREX	$a_{1,1}, a_{1,2}, a_{1,3},$ $a_{3,1}, a_{3,2}, a_{3,3},$ $a_{3,5}, a_{3,8}$	1.569	1.791	2029.091	696	6145.640
WV2 2014	VLL14 ALOS	$a_{1,0}, a_{1,1}, a_{1,2},$ $a_{1,3}, a_{2,1}, a_{2,3},$ $a_{3,1}, a_{3,1}, a_{3,2},$ $a_{3,3}, a_{3,7}$	3.150	3.176	4180.760	627	5300.035
WV2 2014	VLL04R TREX	$a_{1,1}, a_{1,2}, a_{1,3},$ $a_{1,4}, a_{1,6}, a_{1,8},$ $a_{1,10}, a_{2,1}, a_{3,1},$ $a_{3,1}, a_{3,2}, a_{3,3},$ $a_{3,5}, a_{3,6}, a_{3,7}$	3.120	3.350	1899.933	655	5453.236
WV2 2011	G16 SRTM	$a_{1,0}, a_{1,1}, a_{1,2},$ $a_{1,4}, a_{3,1}, a_{3,1},$ $a_{3,2}, a_{3,4}$	4.851	5.102	2126.932	935	9242.572
WV2 2011	G10 SRTM	$a_{1,0}, a_{1,1}, a_{1,2},$ $a_{1,3}, a_{1,5}, a_{3,1},$ $a_{3,2}, a_{3,3}, a_{3,9}$	2.563	2.883	2681.080	935	9442.479

Los RPC óptimos, como primer acercamiento, reportan los coeficientes que aplicando el algoritmo evolutivo PSO obtuvieron mejor comportamiento, observándose que a pesar de que fue solamente analizado el modelo RPC2 (ecuación 2-9), se demuestra que no todos los coeficientes eran necesarios para representar adecuadamente el modelo RFM de cada imagen y por lo tanto estos dependerán también del tipo de puntos de control, en el caso del método mostrado, también del DEM. Por otro lado, como su ejecución requirió de un alto costo computacional para converger a un mínimo global o solución óptima, como evidencia

de esta característica es reportado el tiempo que duraba el proceso, que en promedio para cada imagen fue de 2 horas teniendo en cuenta que todo ese tiempo utilizó los seis núcleos del procesador del equipo utilizado y en comparación a las pruebas con OLS estas duraron menos de 5 segundos.

Con relación a los RMSE radial de ajuste y validación, como primer acercamiento si se realiza la comparación con las tablas 4-5, 4-6 y 4-7 se observa que en términos generales obtuvo un peor comportamiento el uso de los PSO, siendo solamente mejor en la zona de Valledupar con los experimentos realizados con ERDAS. Esta característica sustenta la realización de la validación con la ortoimagen final, porque en este punto se está analizando el ajuste del modelo RFM y no se tiene en cuenta la influencia del DEM, siendo esta característica determinante en los resultados mostrados.

4.3.2. Supuestos estadísticos de los residuales de los puntos de validación

Como soporte de la evaluación final se presenta a continuación los resultados de las pruebas estadísticas realizadas a los residuales producto de la validación de las ortoimágenes derivadas de las pruebas de la tabla 4-11 con el propósito de validar el cumplimiento de los supuestos teóricos que recaen sobre estos a un nivel confianza estadístico del 95 %.

La tabla 4-12 posee los resultados de la aplicación de la prueba de normalidad bivariada y la figura 4-8 el gráfico de densidad de los residuales, la tabla 4-13 posee la validación de homogeneidad a partir de los coeficientes de variación y la tabla 4-14 el análisis de independencia de los residuales.

Tabla 4-12.: Validación de la normalidad bivariada a los residuales producto de la validación de las ortoimágenes obtenidas por PSO a partir de la prueba de Shapiro-Wilk Multivariada.

Imagen	Conjunto de datos	Estadístico MVW	<i>p</i> -valor
WV2 2010	VLL04R SRTM	0.971	0.8516
WV2 2010	VLL06 TREX	0.963	0.6637
WV2 2014	VLL14 ALOS	0.972	0.790
WV2 2014	VLL04R TREX	0.947	0.109
WV2 2011	G16 SRTM	0.931	0.192
WV2 2011	G10 SRTM	0.907	0.046

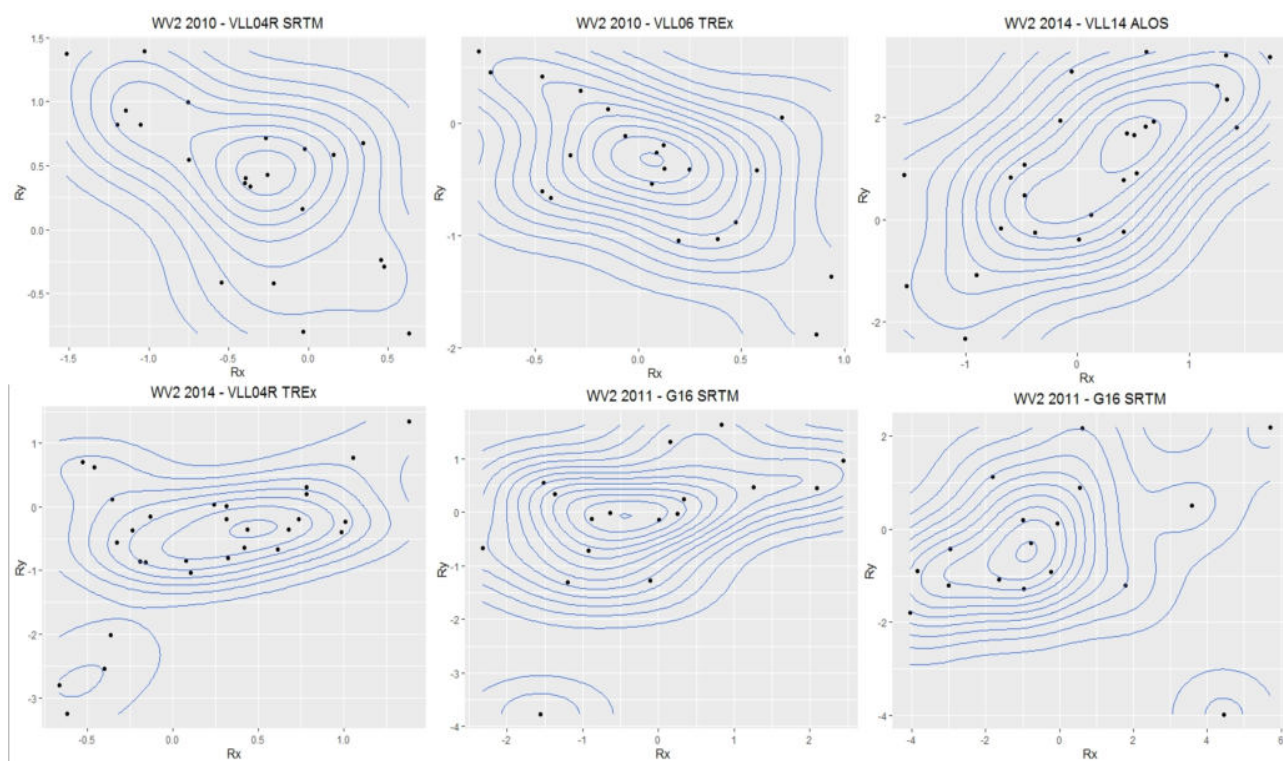


Figura 4-8.: Gráfico de densidad bivariado de los residuales producto de la validación de las ortoimágenes obtenidas por PSO.

Analizando solamente la tabla 4-12 se evidencia que en la mayoría de los casos, a excepción de los residuales de la imagen WV2 2011 con el conjunto de datos G10/SRTM, no existe evidencia estadística para rechazar la hipótesis nula de la prueba de *Shapiro-Wilk multivariada*, debido a que el *p*-valor está muy por encima del 5% que corresponde al nivel de

significancia indicado en la especificación técnica [IGAC, 2020]. No obstante, si se compara este resultado con los gráficos de densidad de la figura 4-8 no es apropiado asumir normalidad bivariada para los residuales de la imagen WV2 2011 y WV2 2014 con los conjuntos de datos G16/SRTM y VLL04R/TREx respectivamente, ya que se observa la presencia de dos grupos distintos dentro de los residuales. Por lo tanto, el supuesto de normalidad bivariada se cumple solamente para los residuales de los dos conjuntos de datos de la imágenes WV2 2010 y el de la imagen WV2 2014 con los provenientes de VLL14/ALOS.

Tabla 4-13.: Validación de la homegeneidad a partir de la igualdad de varianza en cada uno de los componentes de los residuales producto de la validación de las ortoimágenes obtenidas por PSO a partir de la prueba no paramétrica de *Fligner-Killeen*.

Imagen	Conjunto de datos	Estadístico	<i>p</i> -valor
WV2 2010	VLL04R SRTM	0.2717	0.6022
WV2 2010	VLL06 TREX	0.6645	0.4150
WV2 2014	VLL14 ALOS	5.0400	0.0247
WV2 2014	VLL04R TREX	0.5200	0.4708
WV2 2011	G16 SRTM	2.6588	0.1030
WV2 2011	G10 SRTM	1.0804	0.2986

Con la relación a la validación de la homogeneidad en los residuales se decidió realizar la prueba no paramétrica de *Fligner-Killeen* de comparación de varianzas de cada uno de los componentes, los resultados se encuentran consignados en la tabla 4-13. se evidencia que en la mayoría de los casos, a excepción de los residuales de la imagen WV2 2014 con el con el conjunto de datos VLL4/ALOS, no existe evidencia estadística para rechazar la hipótesis nula de la prueba de *Fligner-Killeen*, debido a que el *p*-valor esta muy por encima del 5% que corresponde al nivel de significancia indicado en la especificación técnica [IGAC, 2020]. Lo anterior quiere decir que en la mayoría de los casos se puede considerar igualdad de varianzas de los componentes de los residuales, es decir existe homegeneidad entre estos mismos.

Tabla 4-14.: Validación de la independencia de los residuales producto de la validación de las ortoimágenes obtenidas por PSO a partir de la prueba de correlación de Pearson.

Imagen	Conjunto de datos	Estadístico t	Grados de libertad	p -valor	ρ
WV2 2010	VLL04R SRTM	-4.397	20	2.785E-04	-0.702
WV2 2010	VLL06 TREX	-2.450	19	2.417E-02	-0.489
WV2 2014	VLL14 ALOS	5.281	24	2.455E-05	0.729
WV2 2014	VLL04R TREX	3.471	27	1.760E-03	0.555
WV2 2011	G16 SRTM	0.679	15	5.076E-01	0.173
WV2 2011	G10 SRTM	2.417	15	2.885E-02	0.529

Para la determinación de la independencia se escogió evaluar si existe de forma lineal entre los componentes x y y de los residuales utilizando la prueba de correlación de *Pearson*. Según la tabla 4-14 en la mayoría de los residuales (excepto G16/SRTM) no existe evidencia estadística para rechazar la hipótesis nula de independencia lineal en los residuales. Por consiguiente, se evidencia que no existe independencia lineal en la mayoría de los residuales.

4.3.3. Errores medios cuadráticos residuales y verificación del cumplimiento de la especificación técnica vigente

El último análisis presentado en el capítulo de resultados corresponde a la presentación de los RMSE radiales obtenidos y su comparación con el mejor resultado que arrojó (tablas 4-8, 4-9 y 4-10) el mismo conjunto de datos con OLS en la tabla 4-15.

Tabla 4-15.: Errores medios cuadráticos radiales obtenidos con PSO comparándolo con el mejor obtenido por mínimos cuadrados ordinarios.

Imagen	Conjunto de datos	$RMSE_r$ PSO (m)	$RMSE_r$ OLS (m)	% de Variación
WV2 2010	VLL04R SRTM	0.879	0.912	3.572
WV2 2010	VLL06 TREX	0.504	0.548	8.059
WV2 2014	VLL14 ALOS	2.014	2.145	6.096
WV2 2014	VLL04R TREX	1.293	1.333	3.024
WV2 2011	G16 SRTM	3.116	3.118	0.037
WV2 2011	G10 SRTM	1.767	1.805	2.081

Es evidente que la aplicación de PSO mejoró hasta en un 8% la exactitud posicional de la ortoimagen y en la mayoría de los casos genera ortoimágenes adecuadas para su uso en la escala 1:10.000, sin embargo su variación porcentual respecto a los experimentos OLS oscila en un promedio del 3%. Un aspecto que se debe señalar es que el único experimento (correspondiente a G16/SRTM de la imagen WV2 2011) que no cumplió el valor permitido para escala 1:10.000 en OLS y la aplicación del PSO no realizó un cambio significativo y persistió en dicha no conformidad. Además se observó que los cambios son notorios en las dos imágenes correspondientes al municipio de Valledupar que en la zona de sabana centro y Guavio.

5. Discusión

El capítulo de discusión está conformado por los siguientes ejes temáticos: (i) verificación del cumplimiento de cada uno de los objetivos de investigación; (ii) presentación de ventajas y limitaciones del uso del algoritmo PSO y por último, (iii) las consideraciones generales observadas en el proceso de ortorrectificación a través de los resultados finales de todos los experimentos realizados en la investigación presentada.

Correspondiente al primer objetivo que trata del procesamiento y preparación de los insumos necesarios para los experimentos de ortorrectificación, principalmente la generación de puntos de control adecuados que es correspondiente a la primera etapa de la investigación, se aclara que por la imposibilidad de trabajos previos disponibles que traten con detalle la caracterización de los insumos de la ortorrectificación, los análisis están enfocados en la comparación de los resultados con los supuestos teóricos que deben cumplir los insumos y la especificación técnica vigente. Como primer proceso se realizó la caracterización detallada de los DEM y la determinación de su uso para la escala 1:10.000 observándose que este parámetro no es conforme para ninguno de los DEM analizados, sin embargo como hecho contradictorio se generaron a partir de estas ortoimágenes adecuadas para dicha escala, esta característica abre la discusión de considerar la inclusión de este tipo de aspectos metodológicos en una próxima actualización de la especificación técnica de productos cartográficos.

Por otro lado la preparación de insumos de diferente temporalidad con un enfoque de asegurar la calidad en cada proceso y procesamiento realizado con ellos, especialmente en las actividades relacionadas con los puntos de control y las fotografías aéreas. Todo lo anterior siguiendo los métodos estándares que posee el país, con el propósito de asegurar que los productos e información extraída de esta fuente son adecuados para usarse en la generación de productos cartográficos 1:10.000, esto sustenta que la exactitud de los bloques fotogramétricos fuera óptima para las dos zonas de estudio (Incluso para el bloque VLL04R de fotografías análogas correspondiente al de mayor temporalidad y GSD), atribuido también a que para esta fuente se encuentra definido que sus indicadores de exactitud posicional no debe sobrepasar la mitad del producto final [Heidemann et al., 2013].

El ajuste de los bloques fotogramétricos fue muy adecuado ya que, incluso cumplió en la mayoría de los casos los umbrales necesarios para la escala 1:5.000 que corresponde a 0.75 m. Además, los puntos estereoscópicos resultantes poseen una exactitud posicional inferior a 1 m

y en la mayoría de los casos a 0.5 m, es decir por debajo del tamaño de píxel de la imagen objetivo, cumpliéndose de forma adecuada el supuesto que recae sobre la máxima exactitud posicional establecida por Toutin en su revisión literaria [Toutin, 2004] e incluso son adecuados estos puntos para procesos de validación de productos cartográficos de escala 1:10.000 [Ariza-López et al., 2018], es decir se cumplió con el primer objetivo de la investigación. Los resultados obtenidos afirman que la información proveniente de bloques fotogramétricos es una fuente invaluable, exacta e ilimitada de información geográfica y que debe ser constantemente utilizada ya que, corresponde a uno de los principales activos de información de este tipo.

La segunda etapa de la investigación tiene el propósito de realizar y evaluar los experimentos de ortorrectificación por mínimos cuadrados ordinarios (OLS) usando los puntos estereoscópicos generados en la primera etapa, el resultado indica que los puntos estereoscópicos junto a los DEM (preliminarmente no adecuados para escala 1:10.000) se puede llegar en la mayoría de los casos a la exactitud posicional de un producto cartográfico de escala 1:10.000.

Por otro lado se evidenció que cada software, a excepción de ENVI, indicó un modelo RFM distinto (respectivamente para PCI RPC2 y ERDAS RPC3), esto contradice lo dicho por Aguilar et. al. [Aguilar et al., 2012a, Aguilar et al., 2017] y Barazzetti et. al. [Barazzetti et al., 2016] quienes de forma conjunta indicaron que el modelo adecuado con el ajuste OLS corresponde a RPC0, señalando que esta conclusión esta influenciada en que sus investigaciones utilizaron otro tipo de insumos como los son puntos de control GNSS y solamente DEM fotogramétricos además de que fueron zonas distintas en cuestión de topografía y paisaje. Lo anterior indica que el grado óptimo del modelo RFM depende de las características de la imagen, el tipo de insumos y el método de ajuste.

De forma conjunta y como actividad complementaria en la segunda etapa de la investigación, se realizo un análisis de los distintos programas que permite la ortorrectificación de imágenes satelitales empleando OLS con los mismos conjunto de datos (fuente de puntos de control y DEM) y lecturas junto al mismo procedimiento para la obtención de la ortoimagen final. El resultado final indicó que en la mayoría de los casos hubo módulos que tienen mejores comportamientos, no obstante esto no fue lo esperado puesto que fue aplicado el mismo método y datos, por lo tanto los resultados debieron ser cercanos, por lo que se infiere que cada uno está realizando sus correcciones de forma distinta y por consiguiente el usuario desconoce si existe algún proceso adicional que sea realizado. Referente al comportamiento de las fuentes de puntos (por bloque fotogramétrico) se obtuvo el comportamiento esperado, indicando que la exactitud posicional de la ortoimagen esta en función de la exactitud posicional de la fuente de puntos de control y vertical del DEM, siendo congruente con las indicaciones suministradas por las investigaciones previas [Aguilar et al., 2012a, Altena and Kääb, 2017, Zhang et al., 2016, Topan, 2013].

De la misma forma se confirma el número promedio óptimo de puntos de control recomendado por los estudios consultados [Hariyanto et al., 2019, Jannati and Valadan Zoej, 2015, Shen et al., 2017] que corresponde a un promedio de 15. Sin embargo, como resultado particular se obtuvo un ajuste apropiado aplicando el modelo RPC1 con solo nueve puntos en la imagen WV2 2014 utilizando los puntos del bloque VLL06 para el software PCI, siendo también la ortoimagen con mejor exactitud posicional para este software. Esto sustenta lo dicho previamente, que el modelo RFM depende de características propias del experimento, además esto demuestra que se cumplió de forma adecuada con el segundo objetivo.

El desarrollo de la tercera etapa permitió cumplir los objetivos asociados a la aplicación del algoritmo evolutivo PSO y la validación de la exactitud posicional de los productos derivados de su utilización. Se observaba que los RMSE radiales del ajuste resultantes de la aplicación del algoritmo PSO en comparación a los obtenidos por OLS fueron más altos, además esta característica se presenta también en comparación a los resultados de las investigaciones previas [Alizadeh Moghaddam et al., 2018, Yavari et al., 2013, Li et al., 2018a] que proporcionaron conjuntamente RMSE menores al tamaño de píxel de las imágenes analizadas, sin embargo se debe señalar que la extensión de la imagen en estas investigaciones es menor que la de las zonas de estudio y en la mayoría corresponde a zonas urbanas de topografía plana.

Otra característica observada fue referente a los resultados de la validación con los puntos de control de validación en las ortoimágenes finales, debido a que en la mayoría de los casos no se logra obtener una exactitud posicional menor al tamaño del píxel, pero si se redujo en cierta proporción el resultado final en comparación con los experimentos con OLS, es decir que este método mejoró los resultados en comparación a los convencionales. Pero también este resultado señala, como también se observó en los experimentos OLS, que los indicadores de la exactitud posicional en el proceso de ajuste pueden ser contradictorios con lo que muestra los de validación, por lo tanto no es adecuado realizar la evaluación o aceptación del producto con base a las métricas de solo el ajuste del modelo RFM, ya que este está evaluando es el ajuste del modelo RFM y no la ortoimagen que implica la corrección con el DEM, es decir puede dar una interpretación inadecuada y es más probable realizar alguno de los dos tipos de errores en la evaluación de productos cartográficos que menciona Ariza [Ariza-López et al., 2018].

La obtención de las ortoimágenes por el algoritmo evolutivo PSO y su evaluación demostraron el cumplimiento del propósito de la tercera etapa, sin embargo un aspecto que es tratado en la última sección de los resultados es el relacionado con la evaluación de los supuestos estadísticos que deben cumplir los residuales provenientes de los puntos de control de validación para el uso del estándar NSSDA. Del análisis de los seis experimentos por PSO se demostró que solo los supuestos de normalidad bivariada y homogeneidad se cumple mientras que el de independencia no, lo anterior indica que se debe evaluar con mayor criterio si bajo estas condiciones el RMSE

radial es adecuado para caracterizar la exactitud posicional o se debe utilizar algún estándar distinto al NSSDA que se ajuste a las características de los datos [Ariza-López et al., 2018].

En cuestión de ventajas del flujo propuesto en esta investigación, la principal indica que si una región del país posee los tipos de insumos necesarios (fotografías aéreas de temporalidad no tan alta y fotocontrol recuperable) para la obtención de puntos estereoscópicos con el propósito de realizar la ortorrectificación de imágenes satelitales VHR recientes o también poseer insumos para la validación de productos de escala máxima 1:10.000, no es necesario realizar trabajo de campo adicional. Esto implica que quien administre este tipo de información cuenta con la capacidad de responder estas dos líneas de trabajo en dichas regiones a partir de los insumos fotogramétricos existentes. La ventaja también recae en la utilización óptima de la infraestructura tecnológica para el proceso de ortorrectificación, puesto que se demostró que bajo los insumos preparados solo con OLS de los módulos de los software más utilizados en el mercado, en la mayoría de ellos se puede obtener productos con la exactitud posicional adecuada para escala 1:10.000 de imágenes satelitales VHR que no cuentan con condiciones ideales en relieve y ángulo de incidencia de toma.

La ventaja al aplicar el algoritmo PSO recae en que su aplicación elimina los coeficientes correlacionados y se obtienen modelos RFM ajustados a las condiciones de la imagen y los insumos utilizados en su ortorrectificación. Adicionalmente, el método FCA realiza una evaluación preliminar de la calidad del ajuste del modelo RFM con el DEM, por lo tanto minimiza la probabilidad de ocurrencia de errores sistemáticos provocados por el método OLS [Alizadeh Moghaddam et al., 2018, Cao, 2018, Jannati and Valadan Zoej, 2015, Li et al., 2018a] junto a las distorsiones que puede provocar la corrección por relieve usando el DEM [Aguilar et al., 2012a, Altena and Kääb, 2017, Zhang et al., 2016, Topan, 2013] y esto se evidenció en las mejoras que se observaron en comparación a los resultados con OLS.

Como principal desventaja se encontró que el mejoramiento de la exactitud posicional en promedio de 3% al aplicar PSO, no se justifica el tiempo de procesamiento y los procesos adicionales que demandan además de los recursos computacionales que requiere para obtener una solución adecuada del modelo RFM. El tiempo de procesamiento en promedio es de 2 horas por imagen en un equipo de características como el utilizado en la investigación, pero de forma previa se deben obtener las lecturas imagen de los puntos de control, es decir su identificación en la imagen satelital VHR y por lo tanto esta actividad debe ser realizada en un software de procesamiento especializado. Lo anterior dice que no todas las actividades necesarias están integradas en un solo ambiente, muestra de lo anterior radica en que los RPC obtenidos deben ser exportados manualmente al formato estándar y de esta forma hacer la corrección por relieve en un software especializado. Otro aspecto a considerar es que para su uso se requiere de un software matemático o algún lenguaje de programación especializado, debido a que los algoritmos evolutivos tienen un mejor desa-

rrollo en estas herramientas [Clark, 2017] y no están implementados en software especializados.

Para el análisis de los resultados finales, se debe precisar que las dos zonas de estudio poseen características diferentes en cuestión de paisaje e insumos, siendo este uno de los criterios para su selección. Por lo anterior, tomando los resultados de todos los experimentos en la zona de valledupar, se observó que sin importar el DEM utilizado se obtienen ortoimágenes apropiadas para la escala 1:10.000 (siendo no adecuados los realizados con ERDAS), siendo preferible emplear el DEM TREx y en algunos casos el ALOS. Por otro lado, el hecho de que sea adecuado para la generación de ortoimágenes de escala 1:10.000 tanto los DEM TREx como el ALOS, y además estos dos no son adecuados para esta escala según la especificación técnica vigente, como se demostró en los resultados, es un hecho contradictorio y que se debe precisar con más detalle en investigaciones futuras que traten de forma específica este tema.

Con relación a la zona de sabana centro y el Guavio se observó que no es apropiado utilizar el DEM ALOS/PALSAR, puesto que el ajuste del modelo RFM alcanzado se pierde, debido a que el RMSE radial de la ortoimagen resultante correspondió en promedio a 13 m mientras que el RMSE radial en promedio del ajuste estuvo por debajo de 1.5 m.

Lo anterior se debe a que este DEM describe alturas elipsoidales y el ajuste del modelo RFM se realizó con las alturas ortométricas de los puntos estereoscópicos, siendo recomendable que en una investigación futura se desarrolle un método que permita la transformación de las alturas elipsoidales a ortométricas al sistema vertical GEOCOL2004. Sin embargo, se demostró que utilizando el MDT de Restitución e incluso el SRTM se lograron ortoimágenes adecuadas para la escala 1:10.000.

En conclusión el uso de los DEM de procesos semiautomáticos como lo son de restitución y TREx, los puntos estereoscópicos provenientes de bloques fotogramétricos, y la ortorrectificación realizada tanto por mínimos cuadrados ordinarios como el algoritmo evolutivo PSO, permitieron obtener ortoimágenes adecuadas para la actualización de cartografía básica a escala 1:10.000 de imágenes VHR de ángulos de incidencia mayores a 18° y de zonas de alta montaña.

6. Conclusiones y recomendaciones

6.1. Conclusiones

- El uso combinado de algoritmos evolutivos junto a puntos estereoscópicos provenientes de bloques fotogramétricos en la ortorrectificación de imágenes satelitales monoscópicas de muy alta resolución espacial de ángulos de incidencia superiores a 18° permite la generación de ortoimágenes que cumple con las especificaciones técnicas de la cartografía básica de escala 1:10.000, siempre y cuando sea asegurada que la exactitud posicional de los puntos utilizados en el proceso de ortorrectificación sea adecuada para la generación de este tipo de productos.
- Los puntos estereoscópicos provenientes de bloques fotogramétricos de GSD menores a 0.5 m son un insumo adecuado para obtención de ortoimágenes para la actualización de la cartografía básica a escala 1:10.000 a través del proceso de ortorrectificación de imágenes de muy alta resolución espacial (VHR) realizada tanto por mínimos cuadrados ordinarios (OLS) y el algoritmo evolutivo PSO. Además por la exactitud posicional de estos puntos, también pueden ser utilizados para procesos de validación de productos cartográficos de escala 1:10.000.
- Los modelos digitales de elevación de cubrimiento mundial (GDEM) ALOS, en zonas de ondulación geoidal menor a 3 m, y TREx junto a los fotogramétricos son adecuados para la generación de ortoimágenes de escala 1:10.000, sin embargo la especificación técnica vigente indica lo contrario hacia este tipo de productos, lo cual limita de entrada su uso y se pierde la posibilidad de utilización de GDEM que son más accesibles y disponibles que los fotogramétricos.
- El grado óptimo del modelo *Rational Functional Model* para la ortorrectificación de una imagen VHR depende de los tipos de insumos (fuente de puntos de control y tipo de DEM), topografía de la zona de interés, método de optimización (mínimos cuadrados ordinarios, algoritmos evolutivos, etc.) y condiciones propias de la imagen, por consiguiente no es adecuado indicar uno como el más apropiado.
- El análisis de los resultados finales de algún método de ortorrectificación frente a otro debe ser realizado teniendo dos consideraciones: (i) posean los mismos puntos de control y las mismas lecturas de coordenadas imágenes, debido a que se evita algún tipo de

sesgo y por lo tanto algún error al cuál se le desconoce su naturaleza; (ii) el análisis debe ser realizado sobre la ortoimagen final y no solamente teniendo en cuenta el ajuste del modelo RFM seleccionado con los puntos de control del ajuste y de validación, debido a que el DEM influye significativamente la posición final de los objetos geográficos presentes en la imagen y este producto es el cual se emplea para la actualización cartográfica.

En esta investigación se cumplió con las dos consideraciones anteriores y se encontró que el número mínimo de puntos de control es de 9 para el modelo RPC1 y 15 para el RPC2, y los GDEM TREx, ALOS/PALSAR y SRTM-30 permiten la generación de escala 1:10.000, solo que los últimos dos están en función de las características propias de la zona de estudio.

- El algoritmo evolutivo PSO es adecuado para la ortorrectificación de imágenes VHR, pero su uso requiere de recursos adicionales traducidos en software científico e infraestructura tecnológica, por lo que su empleo en masa no es adecuado realizarlo si se busca su escalabilidad.

6.2. Recomendaciones

- Estudio e investigación de la eficacia de la aplicación de métodos de optimización estadísticos en el ajuste del modelo RFM de imágenes satelitales VHR, un ejemplo de ello es la obtención de la solución a partir del análisis de componentes principales (PCA) utilizando los insumos empleados en la investigación presentada.
- Para la evaluación de productos cartográficos se deben evaluar y explorar métodos distintos al estándar *National Standard for Spatial Data Accuracy* adoptado por la especificación técnica vigente de Colombia, debido a que en los resultados presentados no se cumplen con todos los supuestos estadísticos necesarios para su uso, especialmente el de normalidad e independencia lineal.
- La especificación técnica vigente referente a los modelos digitales de terreno (MDT) consignada en las resoluciones 471 y 529 del 2020 del IGAC debe ser reevaluada, puesto que no son claras las consideraciones que deben ser tenidas en cuenta acerca de los DEM necesarios para la generación de ortoimágenes de escala 1:10.000 y demás escalas grandes.