



Evaluación de la Viabilidad del uso de Aeronaves No Tripuladas para la Elaboración de Cartografía Catastral Multipropósito

Assessment of the Viability of the Use of Unmanned Aircraft for the Elaboration of Multipurpose Cadastral Mapping

Alexandar Vergara¹, David Arenas²

Las tecnologías de la información geográfica como apoyo a la seguridad pública y Nacional

Resumen

Debido a los costos de manutención y operación del avión del Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC), para la producción de cartografía básica y catastral multipropósito, y los tiempos que esta actividad demanda, surge la necesidad de evaluar la viabilidad del uso de aeronaves no tripuladas para regiones pequeñas. Es así que en el año 2016, en labores conjuntas entre la Sociedad Latinoamericana de Especialistas en Percepción Remota y Sistemas de Información Espacial, SELPER (Capítulo Colombia) y el IGAC, se llevó a cabo un proyecto piloto en el municipio de Cabuyaro, departamento del Meta. La metodología del proyecto incluyó actividades de diseño de vuelos, toma de imágenes con ART, toma de puntos de fotocontrol, aerotriangulación, procesamiento de datos, generación de productos cartográficos (DSM, ortofotomosaico), evaluación de exactitud posicional, de acuerdo con especificaciones técnicas preestablecidas y enfocada en una zona de estudio con un área urbana menor a 300 hectáreas. De esta experiencia se concluye que un ortofotomosaico generado bajo condiciones similares a las de esta investigación (extensión, orografía, aspectos ambientales y climáticos, entre otras) es un producto apto para la actualización de cartografía, con una precisión cercana a la obtenida por medio de aeronaves tripuladas. Esta investigación es un primer paso del IGAC hacia la evaluación del uso de estas tecnologías en la elaboración de cartografía oficial, como una alternativa a las metodologías tradicionales de producción cartográfica.

Palabras clave: Aeronaves Remotamente Tripuladas (ART), catastro multipropósito, cartografía, fotogrametría, ortofotomosaico, MDT, fotocontrol.

1. Especialista en Geomática. Centro de Investigación y Desarrollo en Información Geográfica-CIAF (Instituto Geográfico Agustín Codazzi-IGAC). luisalexander.vergar@igac.gov.co

2. Especialista en sistemas de Información Geográfica SIG. Centro de Investigación y Desarrollo en Información Geográfica-CIAF (Instituto Geográfico Agustín Codazzi-IGAC). david.arenas@igac.gov.co





Abstract

Due to the costs of maintenance and operation of the Geographical Institute Agustín Codazzi (IGAC) aircraft, in the production of multipurpose cadastral and base cartography maps, and how time-consuming this activity is, there is a need to evaluate the viability of the use of unmanned aerial vehicle (UAV) for small regions. For this reason, in 2016, in a joint work between the Latin American Society of Remote Sensing Specialists and Space Information Systems (Capítulo Colombia), and the IGAC, a pilot project was carried out in the municipality of Cabuyaro, department of Meta. The research methodology included flight design, image capture with the UAV, photocontrol points, aerotriangulation, data processing, generation of cartographic products (Digital Surface Model, orthophotomosaic) and positional accuracy assessment, according to pre-established technical specifications, focused on a study area with an urban area of less than 300 hectares. From this experience, we found that an orthophotomosaic generated under conditions similar to those of this research (extension, orography, environmental and climatic aspects, among others), is a suitable product for updating cartography with a precision close to those obtained by means of a manned aircraft. This research is a first step for the IGAC regarding the evaluation of these new technologies in the elaboration and production of official cartography, as an alternative to the traditional methodologies of cartographic production

Keywords: *Remotely Piloted Aircraft (RPA), multipurpose cadaster, cartography, photogrammetry, orthophotomosaic, Digital Terrain Model (DTM), photocontrol.*





Introducción

La evolución de nuevas tecnologías, como lo son los vehículos aéreos no tripulados (UAVs) o aeronaves remotamente tripuladas (ART), ha permitido apoyar un sinnúmero de usos: desde el campo militar, origen de esta tecnología, hasta aplicaciones geomáticas como el mapeo, la agricultura de precisión, el monitoreo de cultivos, el transporte de encomiendas livianas, la vigilancia, el cine, la televisión, el ocio y la diversión, entre otras.

En el campo del mapeo, gracias a su versatilidad, rapidez y bajo costo (comparado con la aerofotografía convencional), las ART permiten, a través de sensoramiento remoto, mapear pequeñas porciones de la superficie terrestre de forma ágil, oportuna y a una mayor resolución espacial, que la que se obtendría usando métodos convencionales. Con esto se permite, entre otros usos, la elaboración de cartografía básica, catastral, temática de coberturas y usos de la tierra, y la generación de modelos de construcciones en tercera dimensión.

Actualmente el IGAC presenta limitaciones técnicas frente al suministro de imágenes como insumo para la elaboración de cartografía básica predial de pequeños municipios y corregimientos, debido a que la aeronave con la que cuenta es empleada principalmente para la toma de insumos de áreas a nivel departamental y local de ciudades principales. Con esto se crea una desventaja económica y operacional frente al mapeo de pequeñas poblaciones o áreas pequeñas a nivel nacional, debido a los elevados costos que esto acarrea, sumado a las condiciones atmosféricas que limitan la operación a temporalidades fijas dentro del año.

Por otra parte, las ART son menos costosas en comparación con las aeronaves convencionales. Su costo de operación y mantenimiento son económicos, y permiten rapidez en la planeación y ejecución de vuelos. Además, los techos de operación son notoriamente más bajos, lo que redundo en menores porcentajes de nubosidad, favoreciendo el resultado en la toma y obtención de imágenes. En tal sentido, la elaboración de cartografía a gran escala para aplicaciones de mapeo de áreas pequeñas de la superficie terrestre de forma económica, ágil y oportuna se ve favorecida a partir del empleo de las ART.

Dadas las ventajas de esta nueva tecnología frente a la técnica convencional, el presente estudio busca evaluar la viabilidad del uso de ART para la elaboración de cartografía catastral multipropósito, con el fin de facilitar los insumos para corregimientos pequeños del territorio nacional, a un menor costo y con mayor rapidez que con el empleo de aeronaves tripuladas. En este sentido, se planteó un proyecto piloto en el municipio de Cabuyaro (Meta), dadas sus necesidades en cuanto a la disposición de productos cartográficos actualizados, que sirvieran de base para propósitos catastrales. Acorde a ello, la propuesta de la Sociedad Latinoamericana de Especialistas en Percepción Remota y Sistemas de Información Espacial, SELPER – Capítulo Colombia, planteó la extracción de un modelo digital de superficie (“DSM” Digital Surface Model) y la posterior elaboración de un ortofotomosaico con cobertura de la totalidad del casco urbano del municipio, empleando un ART en calidad de préstamo, de uno de sus asociados.





Materiales y métodos

Para la ejecución de la prueba piloto fue necesaria la adquisición de dos tipos de datos básicos, los cuales fueron obtenidos mediante trabajo de campo en la zona de estudio.

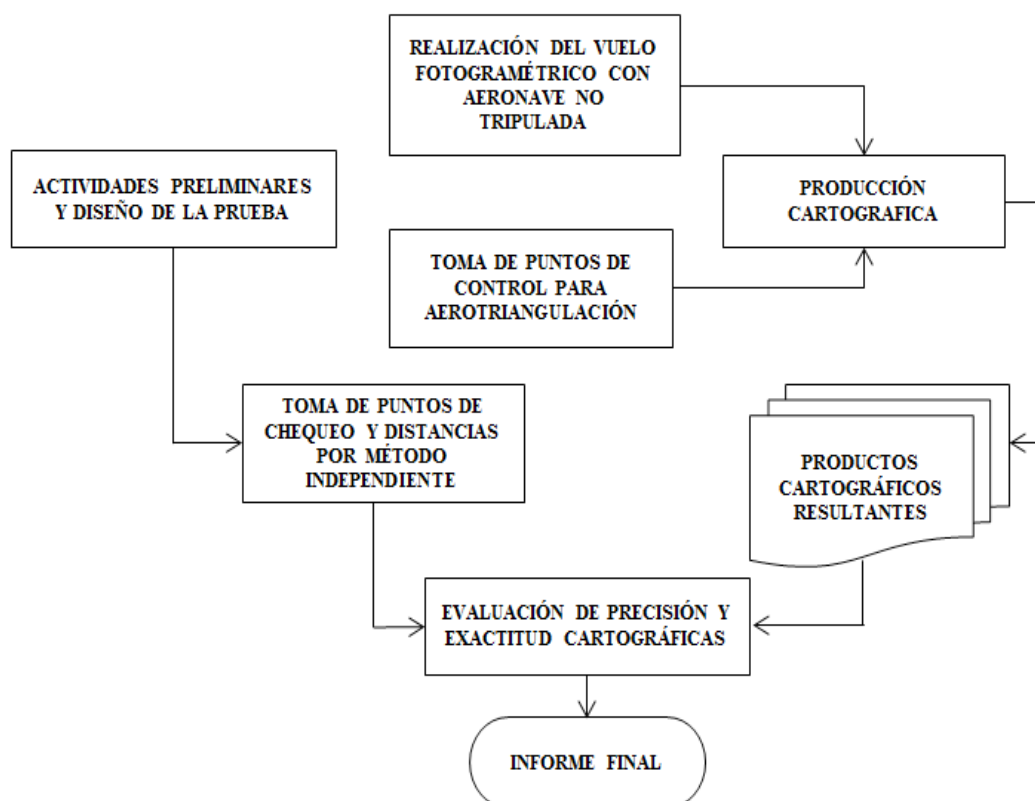
Tabla 1. Parámetros de Vuelo y Fotocontrol Cabuyaro

Tipo de dato	Fuente/suministró	Observaciones
Imagen ART	Selper-Datum Ingenieria	Archivo raster RGB / pixel (m) 0.025
Puntos de Control terrestre	GIT Control Terrestre y Clasificación de Campo -IGAC	Archivos con la determinación de coordenadas cartesianas (horizontal - vertical) de origen local Meta - Cabuyaro – 2012, Datum MAGNA-SIRGAS1 para el ajuste de imágenes aerofotográficas
Punto control de precisión	GIT Control Terrestre y Clasificación de Campo -IGAC	
Puntos de apoyo	GIT Control Terrestre y Clasificación de Campo -IGAC	

Fuente: elaboración de los autores.

El desarrollo de la prueba piloto para la evaluación de la viabilidad del uso de aeronaves no tripuladas comprendió las etapas que se describen en la figura 1, etapas hacen parte, en su mayoría, del proceso fotogramétrico convencional y corresponde a la propuesta de la Sociedad Latinoamericana de Percepción Remota y Sistemas de Información Espacial (SELPER); y al Centro de Investigación y Desarrollo en Información Geográfica – CIAF.

Si bien el proceso seguido es en gran medida similar al efectuado con las aeronaves tripuladas, se describen a continuación cada una de las actividades citadas en la figura 1.





Etapas de Actividades Preliminares y Diseño de la Prueba

Es una de las fases más importantes del proceso cartográfico: de esta fase dependen las demás y su correcta planificación se verá reflejada en las actividades posteriores. De acuerdo a la zona de estudio, se diseñan las líneas de vuelo que la cubren; con arreglo al recubrimiento requerido entre fotografías, se determina la velocidad y altura de vuelo, periodicidad de obturación de la cámara, entre otros aspectos. En esta fase se debe planear de conformidad con las condiciones atmosféricas y ambientales previstas, puesto que condiciones desfavorables pueden afectar seriamente el vuelo y los resultados esperados. Esto en razón a que generan un impacto en la operatividad del sistema y afectan la precisión esperada. Incluso poniendo en riesgo a la aeronave, por la velocidad de los vientos y la lluvia.

En general este tipo de vuelos debe programarse cuando no haya niebla, polvo, zonas inundadas; y en regiones con estaciones, cuando no esté nevando, o con condiciones ambientales que pongan en peligro la misión. La hora del día también es relevante para la planeación del vuelo: se debe buscar, en lo posible, un horario en donde la altura solar sobre el horizonte sea mayor o igual a 40°. Se debe considerar una zona de despegue y aterrizaje adecuado, con arreglo al modo de despegue de la aeronave, puesto que las condiciones de despegue son diferentes para un multi-rotor que para uno de ala fija.

La altura de vuelo constante es otro aspecto a considerar. Para esto se debe tener en cuenta la ondulación del terreno o las zonas montañosas, puesto que puede alterar el tamaño del pixel. Este factor es considerado en aeronaves tripuladas que vuelan a grandes alturas, otro tanto ocurre con drones, cuyo techo de altura es más limitado.

Etapas de Realización del Vuelo Fotogramétrico con Aeronave no Tripulada

Para esta actividad se contó con un Drone Trimble UX5 de ala fija desarrollado para mapeo, y un sensor Sony alfa5100 RGB con lente de 16 x 50 mm para la captura de los datos imagen.

El diseño inicial de los vuelos (dos, para el casco urbano de Cabuyaro) se llevaría a cabo con un total de 54 líneas de vuelo y 6 puntos de fotocontrol. No obstante —y como se citó previamente—, el crecimiento en el área urbana del municipio (entre 30-40% aproximadamente) y la limitación en cuanto a la altura de operación de la aeronave exigido en la Circular Reglamentaria N° 002, Requisitos Generales de Aeronavegabilidad y Operaciones para RPAS de la Unidad Administrativa Especial de Aeronáutica Civil - UAEAC, en su numeral 7.3 Limitaciones de la Operación RPAS en Colombia: “no se permitirá operación RPAS en Colombia para volar a una altura superior a 500 pies (152 metros aproximadamente) Altura Sobre el Terreno (AGL) o sobre el agua”. Esto conllevó a un rediseño del plan de vuelo inicial y, por ende, un mayor número de líneas de vuelo. La tabla 2 describe los principales datos en cuanto a la planificación y la ejecución de los vuelos.





Tabla 2. Parámetros de Vuelo y Fotocontrol Cabuyaro

Parámetros	Programado	Ejecutado
Ground Sample Distance (GDS) Imagen (cm)	5	2,4
Traslapes Lateral y Longitudinal (%)	80	70-80
Altura de Vuelo (m)	300	103
Número de Vuelos	2	3
Número total líneas de vuelo	54	82
Número total de imágenes (3 vuelos)	2000	3631
Número de puntos de control Aerotriangulación	6	22
Número de puntos para control de precisión	No programado	8 + 2 Geodésicos

Fuente: Elaboración de los autores.

Etapas de Toma de Puntos de Control para la Aerotriangulación

Dentro del flujo de actividades desarrolladas en la prueba piloto, se llevaron a cabo, de manera paralela a la realización del vuelo fotogramétrico, las actividades de determinación de los puntos de control necesarios para el proceso de aerotriangulación. La tabla 3 resume las actividades desarrolladas por el GIT de Control Terrestre y Clasificación de Campo.

Tabla 3. Actividades de campo y oficina GIT Control Terrestre y Clasificación de Campo

Antenas GPS	Topcon Hiper SR-1064-15088 (doble frecuencia)
No. Estaciones permanentes	2
No. Puntos Geodésicos materializados	1
Tiempo rastreo /punto geodésico (min/día)	120
No. Vértices bases auxiliares	2
Tiempo rastreo medio / Vértices bases aux. (min/día)	564
No. Puntos de fotocontrol	22
Tiempo rastreo medio /punto de control (min/ día)	70
No. Puntos de control de precisión	8
Tiempo rastreo /punto control precisión (min)	60

Fuente: Elaboración de los autores a partir del informes de los GIT Control Terrestre y Clasificación de Campo y GIT Geodesia, IGAC.





Etapa de Producción Cartográfica

La labor de postproceso (corrección diferencial) para misión de vuelo se realizó en el software *Trimble Business Center Photogrametry*, el cual permitió el geo-etiquetado de cada una de las imágenes obtenidas. Posteriormente se empleó el software UAS Master® 7.0, con el que se generaron los mosaicos ortorectificados, mediante un flujo de trabajo fotogramétrico adaptado a las especificaciones de los productos obtenidos mediante esta tecnología.

El sistema de referencia —expresado en el datum³ geodésico geocéntrico MAGNA-SIRGAS, elipsoide de referencia GRS80⁴— de las imágenes corresponde al mismo sistema de referencia sobre el que se calcularon los puntos de foto control para la zona de estudio del municipio de Cabuyaro (Meta). El Sistema de proyección cartográfica está expresado en coordenadas planas cartesianas⁵ de Gauss Krüger, origen local. La tabla 4 resume los datos.

Tabla 4. Datos de origen cartesiano local

Origen:	META - CABUYARO - 2012
Latitud:	04° 17' 12,73187" N
Longitud	72° 47' 29,44442" W
Norte:	965913.731 m
Este:	1142770.466 m
Plano de Proyección:	173.0 m.s.n.m.m.

Fuente: Elaboración de los autores a partir del informes de los GIT Control Terrestre y Clasificación de Campo y GIT Geodesia, IGAC.

Respecto a la configuración del proyecto se requieren los parámetros de la cámara descritos a continuación.

3 “Orientación y ubicación del elipsoide asociado a un sistema coordenado (X, Y, Z), si éste es geocéntrico se tendrá un Datum Geodésico Geocéntrico o Global; si es local se tendrá un Datum Geodésico Local. Estos últimos también se conocen como Datum Horizontales, dado que la determinación de la altura (H) de los puntos es independiente de sus coordenadas horizontales (ϕ, λ). Un datum geodésico geocéntrico permite establecer las coordenadas para un punto con respecto a la misma superficie de referencia, el elipsoide. En estos, la tercera coordenada se conoce como altura geodésica o elipsoidal (h)”. *Manual de Procedimiento “RED DE ESTACIONES CONTINUAS DEL MARCO GEOCENTRICO NACIONAL “MAGNA – ECO””, Grupo Interno de Trabajo Geodesia, Julio de 2016*

4 “Conjunto de convenciones y conceptos teóricos adecuadamente modelados que permiten definir en cualquier momento la orientación, ubicación y escala de tres ejes coordenados (X, Y, Z). Dado que un sistema de referencia es un modelo, éste es realizado, materializado o implementado, mediante puntos reales cuyas coordenadas son determinadas sobre el sistema de referencia dado”. *Manual de Procedimiento “RED DE ESTACIONES CONTINUAS DEL MARCO GEOCENTRICO NACIONAL “MAGNA – ECO””, Grupo Interno de Trabajo Geodesia, Julio de 2016.*

“Si el origen de coordenadas [X=0, Y=0, Z=0] coincide con el centro de la Tierra se denomina sistema de referencia geocéntrico o global, en caso contrario se habla de sistema de referencia local”. *Manual de Procedimiento “CONTROL TERRESTRE”, Grupo Interno de Trabajo Control Terrestre y Clasificación de Campo, octubre de 2011, versión 3. Manual de Procedimiento “PROCESAMIENTO, ALMACENAMIENTO Y PUBLICACIÓN DE INFORMACIÓN GNSS”, Grupo Interno de Trabajo Geodesia, Diciembre de 2014*

5 “TIPOS DE COORDENADAS MANEJADOS EN COLOMBIA”. IGAC, Subdirección de Geografía y Cartografía, División de Geodesia, Ing. Iaura Sánchez Rodríguez, mayo de 2004.





Tabla 5. Datos de calibración de cámara

Marca / tipo	Sony alfa5100 16-50mm
Distancia focal (mm)	15.5277
Tamaño del Pixel (micrones)	3.920 x 3.920
Punto principal x / y (mm)	-0.0772 / 0.0389

Fuente: Elaboración de los autores

Debido que los sensores empleados en ART presentan grandes distorsiones, un modelo predefinido de distorsión de una cámara por defecto del mismo tipo es mejor que un modelo de “cero” (sin distorsión). Esto mejora la proyección de la posición del punto de control en tierra para cada una de las imágenes, y permite el inicio de la calibración de la cámara. Al igual que los certificados de calibración de las cámaras convencionales (análoga y digital), para el sensor Sony alfa5100 se dispone de dicho modelo, el cual contiene los valores iniciales de distorsión de la lente a partir de su punto principal, medidos radialmente en mm.

Dentro de las tareas de ajuste automático y ajuste con Ground Control Points GCP, puntos de control, se tiene que para el primero se emplean las coordenadas fotocentro, (de centro cámara / exposición). Al igual que las cámaras fotogramétricas digitales convencionales, se cuenta además de los datos anteriores, con los valores de giros registrados en una Unidad de Medición Inercial IMU, pero en este caso los ángulos de rotación se presentan como ángulos de navegación (cabeceo, balanceo y guiñada), y no como ángulos alrededor del eje fotográfico empleados en fotogrametría (ω , ϕ y κ).

Para el proceso de orientación exterior con GCP (ajuste con puntos de control) y la posterior aerotriangulación del bloque, se generaron puntos de paso de forma automática distribuidos homogéneamente en todo el bloque, revisando que el proceso de correlación haya sido satisfactorio. En cuanto a los GCPs, se emplearon en total 22 puntos de control distribuidos en tres vuelos: 9 de ellos aplicaron para el ajuste del vuelo uno, 12 para el vuelo dos y 11 para el vuelo tres. El promedio de imágenes por puntos de control fue de 25, lo que implica que cerca del 15% de fotogramas contenían control en tierra. En total se emplearon 3611 imágenes discriminadas así: 1001 para el vuelo uno, 1298 y 1312 para los vuelo dos y tres, respectivamente.

Con base en el reporte de ajuste de cada uno de los bloques generados por el software, en cuanto al Root Mean Squared (RMS), error medio cuadrático de los puntos de control, se obtuvo lo siguiente:

Tabla 6. Error Medio Cuadrático RMS por vuelo

Vuelo	X (m)	Y (m)	Z (m)
01	0.0067	0.0076	0.0211
02	0.0038	0.0067	0.0121
03	0.0097	0.0097	0.0285

Fuente: Elaboración de los autores





Resulta necesario para la generación del DTM (“Digital Terrain Model”-modelo digital de terreno), realizar una densificación automática de puntos o nube de puntos para cada bloque. Esta nube de puntos es almacenada en archivo tipo DAT y contiene los datos de coordenadas (X, Y) y elevación (Z) para cada uno de los puntos y cuya precisión se encuentra entre uno y dos pixeles en altura. Dicho proceso de densificación da origen al DSM (“Digital Surface Model”-modelo digital de superficie).

Dentro de la práctica para la generación de las ortofotos y el posterior mosaico ortorectificado se emplea un DTM, el cual debe estar bien editado. Además, los elementos constitutivos deben encontrarse sobre el terreno, sin árboles, edificaciones, vehículos, entre otros. Con base en ello, se hizo necesario hacer un filtrado de los datos del DSM obtenido por proceso de multicorrelación de las imágenes. Para esta clasificación, UAS Master® 7.0 emplea un algoritmo conocido como FBM (Emparejamiento con Base en Rasgos), el cual permiten separar automáticamente puntos del terreno y puntos de edificaciones o vegetación en función del tipo de terreno. Debido a las condiciones del área piloto, las cuales presentaban variaciones menores a 2° en la pendiente de la zona y a la necesidad de un producto en breve tiempo se aplicó una clasificación automática a la nube de puntos que da origen al DSM, esto es, por medio del valor promedio de la altura del terreno determinado por el software, para de esta manera obtener un DTM aproximado que facilitó la generación de las ortofotos y los mosaicos por vuelo.

Resultados

Es importante tener en cuenta que, heredado de la modificación hecha a los planes de vuelo programados y los procesos de aerotriangulación efectuados en función de la densidad de datos (imágenes) y la optimización del hardware, se obtuvieron de igual manera productos por vuelo, como se resume en las tablas 6 y 7.

Tabla 7. Formatos del producto DEM

Vuelo	No. Imágenes netas / proceso	No. Ptos correlados	Productos	formato
01	1001	94226	DSM	*.las
02	1298	108354		
03	1312	109734		

Fuente: Elaboración de los autores

Tabla 8. Área de los Productos Ortofotomosaicos

Vuelo	Producto	Formato	Tamaño pixel (m)	Resolución radiométrica	Área cubierta/ mosaico (Ha)
01	Ortofoto-mosaico	*.tif	0.04	8 Bits	91,1
02					120,1
03					123,8

Fuente: Elaboración de los autores





Posterior a la generación de los Ortofotomosaicos por vuelo, se procedió a la integración de estos tres para la conformación del producto final con cobertura total del casco urbano. Esta labor requirió el empleo del software ERDAS Imagine V.2011 con las siguientes tareas de generación y edición de líneas de costura: ecualización de iluminación, balance de color, equilibrio del histograma y remuestreo del pixel de salida: 0,04 m.

La siguiente figura presenta la importancia de una adecuada edición de líneas de costura, la cual corrige la deformación presente en la edificación, vegetación y vía.



Figura. 2. Comparación de imágenes con edición de líneas de costura

Fuente: Elaboración de los autores

Análisis De Resultados

Evaluación de Precisión y Exactitud Cartográfica

Para el control de precisión, se emplearon las descripciones de los puntos denominados *Punto Control Precisión* para su lectura en ArcMap y la posterior evaluación.



Figura. 3. El zoom de trabajo para esta actividad fue de 1:10 a 1:20

Fuente: Elaboración de los autores





Figura. 4. Alineamientos para determinación de puntos de control

Fuente: Elaboración de los autores

La siguiente tabla resume los cálculos efectuados dentro del proceso de control de precisión. Dado que dicha labor debe efectuarse sobre el producto raster final se determinó hacer tres evaluaciones acorde a las escalas: 1:2000 (comercial IGAC), 1:1000 (casos especiales) y 1:500, dada la resolución espacial del ortofotomosaico inicial.

Se describen a continuación cada uno de los ítems relacionados en la tabla 9.

Tabla 9. Calculo Control de precisión

Resultados	Valor		
Escala	1:500	1:1000	1:2000
Número de puntos (n)	10		
Media (m)	0,11	0,11	0.10
Error medio cuadrático RMS (m)	0,13	0,13	0.12
Desviación estándar (m)	0,08	0.07	0.08
Error estándar (m)	0,02	0.02	0.02
Límite error grueso (m)	0,34	0.33	0.33
Intervalo de confianza para un 90% (m)	0,15	0.15	0.14

Fuente: Elaboración de los autores

Número de puntos para el control de precisión:

Para el caso particular, la comisión de geodesia determinó en campo ocho (8) puntos. Sin embargo, dada la posibilidad de inclusión de dos puntos geodésicos determinados dentro del casco urbano, estos últimos se añadieron al ejercicio, teniendo en este caso 10 puntos para esta labor. Es importante subrayar que conforme a la especificación técnica ET_Ortofotomosaico GSD20_V.1.0 del IGAC, deberían emplearse mínimo veinte (20) puntos, ya que un número menor de puntos no es una muestra representativa para la estimación de la exactitud en posición por el método de error medio cuadrático e intervalo de confianza. Pese a ello, y dada el área del producto, se optó por llevar a cabo el método mencionado.





Media:

El valor promedio de vector de desplazamiento de la imagen con respecto a los puntos determinados en campo es 0,11m para las escalas 1:500 y 1:1000; para la escala 1:2000 se observa un valor menor respecto a las otras dos: igual a 0.10m. Lo anterior podría llevar a preguntarse si una mayor resolución espacial del producto, conlleva a mediciones más exactas sobre éste.

Error medio cuadrático:

Dentro de las Normas de precisión final de la resolución número 64 de 1994 del IGAC, en cuanto a la precisión en Planimetría, se tiene que “el error medio cuadrático correspondiente es de 0.30 mm a la escala del mapa.” Específicamente, para los productos raster, el garante de tener una precisión similar a la cartografía de la misma escala es el efectuar mediciones sobre el terreno (a nivel del suelo). De igual manera sobre una imagen ortorrectificada, el RMS deberá tener el valor de un pixel y su equivalente en distancia sobre el terreno.

A partir de lo anterior se tiene que:

$RMS \text{ 1:500} = 0.30 \text{ mm} * EM \text{ (Modulo o factor de la escala)}$

$RMS \text{ 1:500} = 0.15 \text{ m}$

Por su parte, las escalas 1:1000 y 1:2000 tienen 0.30m y 0.60m, respectivamente.

Teóricamente, el RMS comprende la raíz cuadrada de la distancia media horizontal entre todos los puntos de control de precisión identificables y leídos en el mosaico respecto a sus contrapartes individuales adquiridas en terreno. En cuanto al cálculo de dicho parámetro, se aprecia que en los tres casos es menor a 0.15m, valor máximo permisible para la escala 1:500, acorde a la especificación técnica. Los resultados obtenidos para 1:1000 y 1:2000, de igual manera, estarían cumpliendo con holgura.

Desviación estándar

Dado que la desviación estándar permite establecer el grado de dispersión de los datos respecto del valor promedio, se encuentra que esta se está alejando de dicho promedio 0.077m para las tres escalas. En otras palabras, la oscilación de los datos con respecto al punto central es pequeña y no superior a los 0.09 m, en ninguno de los casos.

Error Estándar

Como el error estándar de la media permite determinar el grado de precisión con el que la media de la muestra estima la media de los datos, el valor del error estándar de la media para los puntos leídos es 0,02m para las tres evaluaciones. Dentro de la fundamentación teórica, el valor obtenido, al ser bajo, indica que la estimación ha tenido un buen grado de precisión de la media de los datos. Si se hubiese obtenido un valor mayor en la desviación estándar, de igual manera se hubiese incrementado el valor del error estándar, cuya estimación por ende sería menos precisa.





Limite Error Grueso

Debido a que el valor de la media se ve afectado en función de aquellos puntos cuyas diferencias en coordenadas N-E son mayores, el límite grueso por su parte alcanza el valor= 0.33m promediando —como se ha hecho hasta el momento— con las tres escalas. Analizando los puntos de control de precisión que tienen directa incidencia al respecto, se encuentra que son aquellos, cuya determinación se efectuó en los vértices de edificaciones, las que, debido a que el DTM no pasó por un proceso de edición, presentan deformaciones. Como es de esperarse cuando se excluyen de las estadísticas dichos puntos de control, CP-2, CP-5 y CP-7, tanto la media como el valor del límite grueso disminuyen notoriamente. De hecho, se aprecia un menor límite grueso para la escala 1:2000 con respecto a la 1:500 y 1:1000 como se detalla en la tabla 10.

Tabla 10. Calculo Control de precisión 7 puntos

<i>Escala</i>	<i>No. Puntos (n)</i>	<i>Media (m)</i>	<i>Limite Grueso (m)</i>
1:500	7	0.07	0.23
1:1000		0.07	0.21
1:2000		0.06	0.18

Fuente: Elaboración de los autores

De manera ilustrativa se puede verificar el comportamiento de los mencionados puntos en la siguiente imagen.

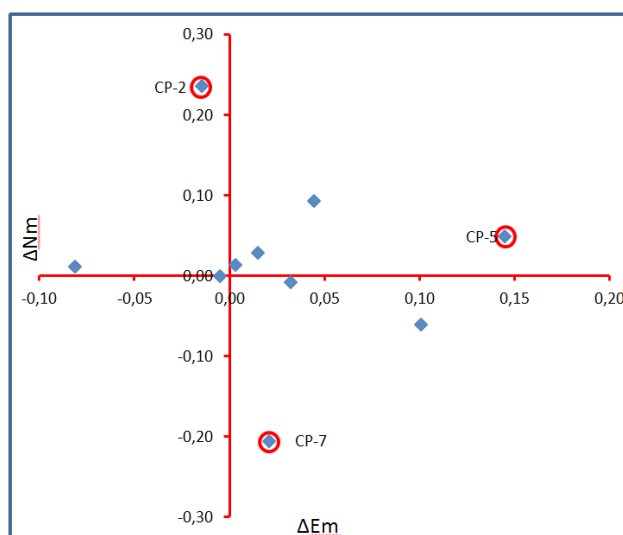


Figura. 5. Alineamientos para determinación de puntos de control

Fuente: Elaboración de los autores

Intervalo de confianza.

Para la determinación de este estadístico es importante definir cuál será el nivel de confianza (Z) a emplear. Para el producto sujeto a evaluación, se utilizó un valor de $Z = 1.645$ a fin de obtener un 90% de confiabilidad y un 10% de error.





La determinación del intervalo de confianza para el 90% permite estimar si los valores obtenidos en las mediciones estarán dentro de este intervalo. Sin embargo, para el ejercicio se debe considerar únicamente el límite superior, puesto que se busca encontrar el máximo valor con la probabilidad determinada.

Acorde a los valores de la tabla 9, se encontró que para la escala 1:2000 el IC90% = 0.14 m es menor que en las otras dos escalas evaluadas, pese a que el error estándar es igual para las tres escalas (0.02). El valor de la media para la escala 1:2000 es menor que en las otras, lo que hace que el intervalo tenga este comportamiento. Esto implica que al tener un intervalo de confianza menor, se ofrece una estimación más precisa, pero aumenta su probabilidad de error. Pese a lo anterior, el valor obtenido de la media de los datos para cada uno de los casos se halla por debajo del límite, como debe ser.

En términos generales, el resumen estadístico de la tabla 9 ha permitido mostrar un buen comportamiento del producto raster (ortofotomosaico) en cuanto a la evaluación de exactitud de posición.

Validación del producto cartográfico

Los análisis efectuados en el anterior apartado permitieron hacer un estimativo únicamente en cuanto a la exactitud del producto. Sin embargo, es necesario hacer una revisión con base en los demás ítems estipulados en la ET_Ortofotomosaico GSD20_V.1.0 del IGAC.

Tabla 11. Ítems para evaluación de Calidad

INFORME DE CALIDAD				
Item	Medida	Descripción	Resultado de conformidad	Observaciones
Comisión	Porcentaje de Comisión	% de áreas en exceso / límite del proyecto	El producto cumple con la medida de calidad 3%	No se habían definido límites exactos, por tanto estos ítems se cumplen
Omisión	Porcentaje de Omisión	% de áreas faltantes / límite del proyecto	el producto cumple con la medida de calidad 3%	
Consistencia Conceptual	Conformidad en la resolución espacial	Verificación del tamaño pixel del ortofotomosaico	Verdadero	Remuestreo del pixel = 0,2 m
Consistencia Conceptual	Conformidad de Resolución Espectral	Verificación de cantidad y correspondencia de bandas espectrales de la imagen	Verdadero	RGB
Consistencia Conceptual	Conformidad de Resolución Radiométrica	Verificación de número de niveles radiométricos	Verdadero	0-255
Consistencia de formato	Formato de entrega	Verificación de la estructura del formato	Verdadero	.Img.
Consistencia topológica	Consistencia del mosaico	Verificación empalme entre ortofotos adyacentes (continuidad cromática y geométrica)	El producto cumple con la medida de calidad $\leq 5\%$	Tener en cuenta número de imágenes = 3611 y proceso de remuestreo
Exactitud de posición externa o absoluta	Error medio cuadrático en posición	Desviación estándar de valor verdadero sobre mediciones de mayor exactitud posicional.	0.12 m Esc: 1:2000 0.13 m Esc: 1:1000	El método de evaluación se efectuó para las escalas (1:2000, 1:1000 y 1:500)

Fuente: especificación técnica Ortofotomosaico GSD20_V.1.0 del IGAC, 2016





Conclusiones

El producto raster ortofotomosaico, generado bajo condiciones similares a las del proyecto piloto (extensión, orografía, condiciones ambientales y climáticas entre otras), puede ser potencialmente útil a entidades territoriales tales como municipios, provincias y distritos, en cuanto a la posibilidad de contar con cartografía actualizada y de precisión próxima a la obtenida por medio de aeronaves tripuladas.

Es importante tener en cuenta que si bien el ortofotomosaico obtenido puede ser en cierta medida apropiado, no lo hace en igual medida el modelo digital del terreno (DTM), puesto que en el proceso de generación de éste, se explotan algoritmos automáticos para una aproximación a tal producto, el cual, para alcanzar un grado de mayor aptitud, requiere de actividades de edición, preferiblemente en ambiente estereoscópico, dada las prestaciones y desarrollo actual de los software de procesamiento para este tipo de imágenes.

La necesidad de fotocontrol resultó evidente por cuanto se pretendía hacer un ejercicio de validación del producto ortofotomosaico con las prestaciones similares a las de un ortofotomosaico obtenido con cámara fotogramétrica y aeronave tripulada.

En cuanto a la exactitud de posición absoluta, los puntos de control de precisión mínimos requeridos acorde exigencias de las especificaciones técnicas para la elaboración de Ortofotomosaicos: “no deben ser menores a veinte (20)...no obstante la definición del número de puntos se establecerá de acuerdo con las características específicas del proyecto”. Considerando lo anterior, se aprecia que los resultados de la prueba fueron satisfactorios. Ello debido en gran medida a las características de la zona de estudio, principalmente a la topografía, cuyos valores de pendiente en general no superaron el 2 %. En este sentido, al ser un área bastante plana, se consigue un efecto positivo en la geometría del bloque que repercute en los procesos de correlación de las imágenes, que tuvieron un comportamiento favorable en términos de redundancia de datos. Por tanto, contar con solo diez puntos de control fue suficiente acorde a la condición de prueba del proyecto.

El producto ortofotomosaico fue evaluado atendiendo a las especificaciones ET_Ortofotomosaico GSD10_V.1.0 y ET_Ortofotomosaico GSD20_V.1.0 dadas sus características. Lo anterior tuvo los siguientes propósitos:

- Considerar la viabilidad del uso del producto ortofotomosaico derivado de aeronaves remotamente tripuladas ART para áreas urbanas menores a 500 ha localizadas en zonas planas, con el propósito de brindar amplias posibilidades de actualización catastral a un gran número de centros poblados del país y a costos visiblemente razonables.
- Determinar a partir de ello la calidad de producto, descrito como el conjunto de propiedades y características de un producto que le otorgan su aptitud para satisfacer necesidades establecidas e implícitas, NTC 5043.





- Tomar como punto de partida las especificaciones citadas para la elaboración de una especificación técnica aplicable en su totalidad, a productos cartográficos derivados de imágenes obtenidas a partir de ART.
- Dentro de los diversos usos que tiene un ortofotomosaico, se encuentra el de insumo al componente físico-jurídico para la función del catastro en cuanto al apoyo de las actividades de planeación y ejecución del levantamiento planimétrico predial, mapa catastral digital y soporte para la representación entre otras; apoyo posible con el producto generado, puesto que como se citó previamente, cumple con las Especificaciones Técnicas de Cartografía Básica IGAC.



Bibliografía

- Ariza López, F. (2001). *Calidad en la Producción Cartográfica. España*.
- Atkinson Gordo, A. D. (2001). *Los Diferentes Test para el Control de Calidad Posicional en Cartografía*. Cáceres, España.
- Federal Geographic Data. (1998). *Geospatial Positioning Accuracy Standards*. Part 3. Virginia, Estados Unidos.
- Garcia, J. L. (2002). *Fotogrametría Moderna: Analítica y Digital*. Valencia: U.P.V.
- ICAC. (Diciembre de 2009). *Instructivo Diseño de Vuelos Fotogramétricos V.1*. Bogotá, Colombia.
- ICONTEC. (2008). *Documentación, presentación de trabajos, tesis y otros trabajos de investigación*. Bogotá, Colombia.
- IDECA. (Mayo de 2013). *Instructivo para la Elaboración de Planes de Producción de Información Geográfica*. Bogotá, Colombia.
- IDECA. (s.f.). *Política de Producción de Información Geográfica*. Bogotá, Colombia.
- IDECA. (s.f.). *Reglamentación Política de Producción de Información Geográfica*. Bogotá, Colombia.
- IGAC. (1994). *Resolución Número 64 de 1994*. Bogotá, Colombia.
- IGAC. (2010). *Instructivo*. Bogotá: N/A.
- IGAC. (Octubre de 2011). *Manual de Procedimientos Toma de Aerofotografías*. Bogotá, Colombia.
- IGAC. (Septiembre de 2014). *Metodología Investigación, Desarrollo e Innovación*. Bogotá, Colombia.
- IGAC. (2016). *Especificaciones Técnicas Cartografía Básica*. Bogotá, Colombia.
- Martínez Casasnovas, J. (1999). *Modelos Digitales de Terreno: Estructuras de Datos y Aplicaciones de análisis de formas del terreno y en Edafología*. Lleida: Quaderns Dmacs, Núm. 25.
- NTC 5043. (16 de 01 de 2000). *Información Geográfica Conceptos Básicos de Calidad*. Bogotá, Colombia.
- NTC 5205. (22 de 10 de 2003). *Precisión de Datos Espaciales*. Bogotá, Colombia.
- NTC 5660. (19 de 05 de 2010). *Información Geográfica Evaluación de la Calidad. Procesos y Medidas*. Bogotá, Colombia.
- Paez Lancheros, A. (2013). *La calidad en los mapas*. Bogotá, Colombia.

