

INTEGRACIÓN DE NTRIP Y DRONES RTK PARA LA GENERACIÓN DE ORTOIMÁGENES DE ALTA PRECISIÓN

Daniel Elías Moreira Mosquera
Estudiante de la Maestría en Geomática. Facultad de Posgrado
Universidad Técnica de Manabí - UTM
Daniel.moreira@utm.edu.ec
<https://orcid.org/0009-0002-2578-3614>

Henry Antonio Pacheco Gil
Departamento de Ciencias Agrícolas, Facultad de Ingeniería Agrícola
Universidad Técnica de Manabí - UTM
henry.pacheco@utm.edu.ec
<https://orcid.org/0000-0002-9997-9591>

Alexis Wladimir Valle Benítez
FIIC-Facultad de Ingeniería, Industria y Construcción
Universidad Laica Vicente Rocafuerte
avalleb@ulvr.edu.ec
<https://orcid.org/0000-0002-9274-3738>

RESUMEN

Los drones con posicionamiento han transformado los levantamientos topográficos, donde la optimización de tiempo y recursos es clave en proyectos de ingeniería y ordenamiento territorial. Tradicionalmente, la georreferenciación precisa de ortomágenes dependía de puntos de control terrestre (GCPs), que aseguran alta exactitud, pero requieren logística compleja y mayor esfuerzo en campo. Como alternativa, las correcciones diferenciales vía NTRIP permiten reducir el número de GCPs, minimizando tiempos, aunque persiste el debate sobre su equivalencia en precisión. Este estudio se realizó en un predio de 2 ha en Guayaquil, comparando dos ortomosaicos: uno ajustado con 8 GCPs y otro generado únicamente con NTRIP. Ambos vuelos a 90 m produjeron ortomosaicos con un GSD de 2,4 cm/píxel, validados mediante puntos GNSS independientes. Los resultados muestran precisiones centimétricas en planimetría, pero mayor sesgo vertical con NTRIP. Se concluye que ambas metodologías son comparables, aunque los GCPs siguen siendo indispensables en aplicaciones críticas.

Palabras clave: Drones RTK; Puntos de control terrestre; Fotogrametría aérea; Precisión topográfica.

INTEGRATION OF NTRIP AND RTK DRONES FOR THE GENERATION OF HIGH-PRECISION ORTHOIMAGES

ABSTRACT

Drones with real-time positioning have transformed topographic surveys, where the optimization of time and resources is crucial in civil engineering and land management projects. Traditionally, the precise georeferencing of orthomosaics relied on Ground Control Points (GCPs), which ensure high accuracy but require complex logistics and significant field effort. As an alternative, differential corrections via NTRIP allow for a reduction in the number of GCPs, minimizing time, although the debate regarding their equivalence in accuracy remains. This study was conducted on a 2-hectare site in Guayaquil, comparing two orthomosaics: one adjusted with 8 GCPs and another generated exclusively with NTRIP. Both flights at 90 m produced orthomosaics with a GSD of 2.4 cm/pixel, validated through independent GNSS checkpoints. The results show centimeter-level accuracy in planimetry but greater vertical bias with NTRIP. It is concluded that both methodologies are comparable, although GCPs remain indispensable in critical applications.

Keywords: RTK drones; Ground Control Points; Aerial photogrammetry; Surveying accuracy.

INTRODUCCIÓN

La creciente demanda por levantamientos geoespaciales de alta precisión en proyectos de ingeniería civil, obras viales, planificación urbana y monitoreo ambiental en Ecuador ha estimulado la adopción de tecnologías emergentes basadas en vehículos no tripulados (UAV/drones) con Sistema Global de Navegación por Satélite GNSS (por sus siglas en inglés, *Global Navigation Satellite System*) de alto desempeño como herramienta cotidiana en geomática. Estos sistemas permiten capturar datos a escala métrica o submétrica con rapidez, reduciendo costos y tiempos frente a métodos tradicionales de topografía. No obstante, su adopción requiere garantías de exactitud posicional para

Comentado [AM1]: En plural

que los productos (ortomosaicos, modelos digitales, curvas de nivel) sean aceptables en diseño, replanteo y aprobación técnica municipal o estatal.

Tradicionalmente, la georreferenciación de imágenes aéreas dependía fuertemente de puntos de control terrestre (GCPs) medidos con GNSS de alta precisión para vincular el modelo fotogramétrico con el sistema de referencia real. Los GCPs actúan como anclas externas que permiten ajustar errores sistemáticos del modelo, especialmente en altimetría, como el efecto de “doming” y sesgos verticales (Emlid, 2024a).

Sin embargo, la instalación, medición y transporte de GCPs implica un incremento sustancial en tiempo de campo y logística, particularmente en zonas de difícil acceso, terreno accidentado o vegetación densa (James et al., 2017). En ese contexto, surge una alternativa: la integración de correcciones GNSS en tiempo real vía NTRIP/RTK, que permite georreferenciar imágenes durante el vuelo con correcciones diferenciales transmitidas desde estaciones de referencia o redes GNSS de monitoreo continuo (Tomaščík et al., 2019). Esta capacidad de prescindir total o parcialmente del apoyo terrestre ha revolucionado la adquisición de datos geoespaciales, permitiendo optimizar el rendimiento económico y humano en levantamientos de gran cobertura sin comprometer los umbrales de tolerancia exigidos en la práctica profesional (Forlani et al., 2018).

El uso de RTK/NTRIP durante el vuelo promete eliminar o reducir notablemente la necesidad de GCPs, acelerando los procesos en campo y simplificando la logística (DroneDeploy, 2025). En ese modo, el receptor GNSS del dron aplica correcciones instantáneas, lo que puede entregar precisión centimétrica horizontal y vertical si la red y la conectividad son adecuadas (Geonadir, 2025). No obstante, esta metodología

depende críticamente de la calidad del enlace, cobertura de red y estabilidad de la señal; interrupciones o latencias pueden degradar la exactitud de los datos. Por ello, muchos autores recomiendan combinar RTK/NTRIP con un número reducido de GCPs como respaldo de control y para calibrar posibles desalineamientos (Emlid, 2024b).

En el contexto ecuatoriano, la disponibilidad de redes GNSS de monitoreo continuo (por ejemplo, la Red GNSS de Monitoreo Continuo del Ecuador, REGME, administrada por el Instituto Geográfico Militar) amplía la factibilidad del uso de NTRIP para georreferenciación en tiempo real (IGM s. f.). No obstante, la precisión alcanzable localmente, en condiciones reales de campo, requiere validación experimental con datos propios para garantizar su aplicabilidad en proyectos concretos del país.

Estudios comparativos en Latinoamérica y el mundo (Camisay et al., 2014; de Fátima et al., 2021 & Zamora et al., 2025), muestran que los resultados obtenidos mediante RTK/NTRIP sin GCPs pueden aproximarse en precisión planimétrica a los obtenidos con GCPs, con diferencias en el orden de 1 a 2 cm; en la componente vertical, las discrepancias suelen ser mayores (hasta 3-5 cm), especialmente si existen sesgos sistemáticos no corregidos o condiciones adversas de señal (Pix4D, 2017). Otros trabajos, incluso en Ecuador, han evaluado múltiples tecnologías topográficas para levantamientos, y destacan que la elección del método debe responder al balance precisión-eficiencia para el proyecto específico (Martínez, 2023).

Dado este panorama, se ha planteado como objetivo, evaluar la precisión posicional y la viabilidad técnica de la integración de correcciones GNSS mediante NTRIP en drones RTK para la generación de ortomágenes de alta precisión, mediante la comparación de ortomosaicos georreferenciados con puntos de control terrestre (GCPs) y ortomosaicos

generados exclusivamente con correcciones NTRIP en condiciones reales de campo en Ecuador.

METODOLOGÍA

Área de estudio

El estudio se desarrolló en un predio experimental de 2 hectáreas (Figura 1), ubicado en la zona de la vía a la costa, cantón Guayaquil, provincia del Guayas, Ecuador. Este terreno fue seleccionado por su representatividad en cuanto a condiciones topográficas y logísticas frecuentes en proyectos de ingeniería civil y estudios geomáticos en el país. El relieve es predominantemente llano, con ligeras ondulaciones, lo que lo convierte en un escenario adecuado para pruebas de precisión geométrica. Las coordenadas de los vértices del polígono de levantamiento se definieron en el sistema oficial WGS 84 / UTM Zona 17S, conforme a las especificaciones establecidas por el Instituto Geográfico Militar ((IGM), Instituto Geográfico Militar del Ecuador - REGME, s.f.).

Figura 1. *Polígono de vuelo sobre el predio en análisis*



La elección de un área relativamente reducida (2 hectareas) respondió a la necesidad de controlar con precisión todos los factores operativos, minimizar, como se observa en

la figura 2, la interferencia de obstáculos (vegetación alta, edificaciones) y asegurar una logística eficiente para la instalación de puntos de control y verificación.

Figura 2. Foto del predio objeto del trabajo



- Escenario 1 - GCPs: ortomosaico ajustado mediante 8 puntos de control terrestre (Ground Control Points, GCPs), distribuidos homogéneamente a lo largo del área del predio, siguiendo las recomendaciones de distribución mínima para fotogrametría aérea (Pix4D, Pix4D Support Documentation, 2017).
- Escenario 2 - NTRIP: ortomosaico generado exclusivamente con las coordenadas corregidas en tiempo real mediante el protocolo NTRIP (Networked Transport of RTCM via Internet Protocol), prescindiendo totalmente de GCPs en el proceso de ajuste.

Ambos escenarios fueron evaluados en igualdad de condiciones (misma área, misma planificación de vuelo, mismo procesamiento fotogramétrico) para asegurar la comparabilidad directa de los resultados.

Equipos y software

Para la adquisición de datos aéreos se utilizó un dron DJI Mavic 3 Multispectral, equipado con un receptor GNSS RTK y cámara multiespectral de 20 Mpx (banda visible RGB y 4

bandas multiespectrales: verde, rojo, borde rojo e infrarrojo cercano). El sistema incorpora una cámara RGB con obturador mecánico, sensor CMOS de 4/3" y capacidad para capturar imágenes georreferenciadas con precisión centimétrica en combinación con correcciones RTK/NTRIP.

Para el levantamiento de los GCPs y los puntos de verificación independientes se empleó un receptor GNSS SinoGNSS T30, de doble frecuencia y capacidad de trabajo en modo estático y RTK, con precisiones nominales de ± 8 mm + 1 ppm en horizontal y ± 15 mm + 1 ppm en vertical. Este equipo se configuró en modo estático rápido para garantizar la confiabilidad de las mediciones.

El procesamiento fotogramétrico se realizó con el software Agisoft Metashape Professional v.2.0, reconocido por su robustez en ajuste de bloques y reconstrucción de nubes de puntos densas. Para análisis complementarios y verificación de resultados se emplearon los programas ArcGIS Pro y Global Mapper, que permitieron evaluar desplazamientos residuales, generar mapas de error y visualizar modelos tridimensionales.

Planificación y ejecución de vuelo

Ambos vuelos se planificaron bajo las mismas condiciones:

- Altura de vuelo: 90 m.
- Solapamiento frontal: 80 %.
- Solapamiento lateral: 70 %.
- Resolución GSD (Ground Sampling Distance): $\approx 2,4$ cm/píxel.
- Cobertura: 100 % del polígono de 2 ha.
- Número de imágenes capturadas: 85.

- Horario de vuelo: entre las 10h00 y 11h00, con condiciones de iluminación estable para minimizar sombras proyectadas y variaciones radiométricas.

La planificación se efectuó con el software nativo DJI Pilot 2, delimitando un polígono de misión rectangular que cubrió toda el área de estudio. Se verificó previamente la conectividad de datos móviles para garantizar la recepción de correcciones en tiempo real vía NTRIP en el escenario correspondiente.

Establecimiento de la base GNSS

Para garantizar la precisión y confiabilidad de las mediciones GNSS, se implementó un punto base de referencia que sirvió como origen para el levantamiento topográfico y fotogramétrico. El procedimiento seguido incluyó las siguientes etapas:

1. Selección del sitio de la base

La estación base se instaló en un área despejada, libre de interferencias electromagnéticas y con horizonte abierto en al menos 15° sobre el nivel del terreno, a fin de asegurar la recepción simultánea de un número adecuado de satélites (>15) de las constelaciones GPS, GLONASS, Galileo y BeiDou.

El punto se ubicó en una zona estable, fuera del área de tránsito de vehículos y maquinaria, y a salvo de vibraciones o desplazamientos.

2. Monumentación temporal

Para la monumentación temporal se utilizó una diana de color azul con blanco, diseñada específicamente para ofrecer un alto contraste y ser claramente visible tanto durante los trabajos en campo como en las imágenes aéreas capturadas por el dron.

Sobre esta diana se colocó un trípode equipado con un adaptador roscado, asegurando con ello la perfecta verticalidad y estabilidad de la antena del receptor SinoGNSS T30 a lo largo de las lecturas. Asimismo, la altura instrumental (HI) se midió con precisión milimétrica en tres ocasiones distintas; a partir de estas mediciones se registró un promedio final de 1.678 metros, medidos desde el centro de la diana de referencia hasta el centro de fase de la antena.

3. Configuración de la base

El receptor SinoGNSS T30 se configuró para operar en modo estático durante un periodo de observación continuo no menor a 30 minutos, empleando una frecuencia de registro de datos establecida en 1 Hz.

Una vez finalizada la sesión de campo, los datos crudos observados fueron procesados en gabinete mediante técnicas de posicionamiento diferencial relativo, tomando como referencia la estación de la Red GNSS de Monitoreo Continuo del Ecuador (REGME) más cercana. Dicha estación es administrada por el Instituto Geográfico Militar (IGM), lo que garantizó el cálculo preciso de las coordenadas definitivas del punto base bajo el sistema de referencia oficial WGS84 / UTM Zona 17S.

4. Transmisión de correcciones diferenciales

Una vez determinada la posición geográfica del punto base con sus respectivas coordenadas ajustadas, el receptor local se configuró en modo de estación base RTK para coordinar los flujos de trabajo. En el escenario metodológico que requirió el uso de puntos de control terrestre (GCPs), la estación base facilitó el posprocesamiento riguroso de las coordenadas de dichos puntos de apoyo. Por otro lado, en el escenario operado mediante NTRIP, el dron DJI Mavic 3 Multispectral recibió las correcciones

diferenciales en tiempo real de manera directa desde la red de estaciones de referencia de operación continua (CORS) a través del protocolo NTRIP, quedando la base local configurada únicamente como un respaldo de seguridad y referencia secundaria.

5. Control de calidad

El control de calidad inició con la verificación de la estabilidad geométrica del punto base (representada en las Figuras 3 y 4), comprobando que las coordenadas definitivas calculadas en el sistema WGS84 presentaran un error inferior a $\pm 0.015 \text{ m}$ en su componente planimétrica y a $\pm 0.020 \text{ m}$ en la altimétrica; estos rangos permitieron cumplir holgadamente con las tolerancias técnicas exigidas para proyectos cartográficos a escala 1:1,000. Adicionalmente, se corroboró de manera estricta la correcta configuración de los parámetros geodésicos del proyecto, validando el uso del datum WGS84, la proyección UTM zona 17S y el elipsoide GRS80, manteniendo así una consistencia absoluta con el marco geocéntrico nacional del Ecuador.

Figura 3. *Ubicación del punto Base*



Figura 4. Ubicación del punto base



Puntos de control y verificación

- GCPs (Ground Control Points): En el escenario 1 se instalaron 8 GCPs señalizados con dianas de alta visibilidad, distribuidos homogéneamente en los extremos y el interior del polígono (Figura 5). Estos GCPs fueron utilizados únicamente en el ajuste del modelo fotogramétrico.

- Checkpoints (Puntos de verificación): Para ambos escenarios se emplearon 20 puntos de verificación independientes, medidos con GNSS SinoGNSS T30. Estos puntos se distribuyeron de manera uniforme en toda el área, sin ser utilizados en el ajuste de los modelos, con el propósito de validar objetivamente la precisión planimétrica (X, Y) y altimétrica (Z) de cada ortomosaico.

Figura 5. *Ubicación de los Puntos de Control*



Procesamiento fotogramétrico

El procesamiento fotogramétrico se llevó a cabo mediante un flujo de trabajo estructurado en el software Agisoft Metashape, el cual inició con la importación de las imágenes aéreas junto a sus respectivas coordenadas RTK asociadas. Posteriormente, se ejecutó el alineamiento de las fotografías, proceso que incluyó la calibración de los parámetros internos de la cámara para corregir distorsiones ópticas. Para el ajuste de bloque, el análisis se bifurcó en dos enfoques metodológicos: un primer escenario que incorporó los 8 Puntos de Control Terrestre (GCPs) dentro de la aerotriangulación, y un

segundo escenario donde el ajuste se realizó únicamente a partir de las coordenadas obtenidas vía RTK/NTRIP.

Una vez consolidada la geometría del bloque, se procedió a la generación de la nube de puntos densa mediante la aplicación de un algoritmo de correlación multi-view. A partir de este producto tridimensional, se construyó el Modelo Digital de Superficie (MDS) y se derivó el ortomosaico georreferenciado final. El flujo concluyó satisfactoriamente con la exportación de estos productos cartográficos de alta resolución, quedando optimizados para su posterior integración y análisis espacial dentro de un Sistema de Información Geográfica (GIS).

Evaluación de la precisión

La validación se realizó mediante el uso de 20 puntos de verificación independientes, los cuales permitieron comparar las coordenadas obtenidas directamente en los ortomosaicos frente a las coordenadas de referencia medidas en campo con tecnología GNSS. A partir de este cotejo, se calcularon tres indicadores estadísticos fundamentales: el error cuadrático medio (RMSE) planimétrico para evaluar la precisión en los ejes X e Y, el RMSE altimétrico enfocado en la dimensión Z, y el sesgo vertical promedio, empleado específicamente para identificar y cuantificar la magnitud de posibles desplazamientos sistemáticos en el modelo.

Los resultados se contrastaron con los criterios de aceptación del estándar ASPRS Positional Accuracy Standards for Digital Geospatial Data ((ASPRS), 2023), que establece clases de precisión basadas en valores de RMSE.

Análisis comparativo

Además de la precisión geométrica, se evaluaron diversos aspectos operativos con el fin de ponderar la viabilidad de los flujos de trabajo. En primer lugar, se midió el tiempo total de campo requerido para cada metodología, contrastando directamente los lapsos invertidos en la colocación y levantamiento de los GCPs frente a la agilidad del vuelo ejecutado con correcciones RTK/NTRIP. En segundo lugar, se analizó la eficiencia logística, tomando en cuenta la cantidad de personal técnico necesario, la complejidad de los equipos y los recursos generales empleados en cada jornada. Finalmente, se determinó la factibilidad técnica del proyecto en función de dos variables críticas: la dependencia de la cobertura de red móvil para la recepción de correcciones NTRIP en tiempo real, y el nivel de trazabilidad documental que ofrecen los GCPs físicos como respaldo empírico en procesos de auditorías técnicas.

Este enfoque metodológico permitió cuantificar diferencias métricas y operativas entre ambas metodologías, determinando su aplicabilidad a proyectos de geomática e ingeniería civil en el contexto ecuatoriano.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El análisis y la validación de los productos fotogramétricos generados permitieron evaluar de forma cuantitativa el desempeño geométrico y operativo de los sistemas de georreferenciación aérea implementados. Como paso inicial para delimitar geométricamente el entorno experimental, se procedió al levantamiento geodésico y la configuración del perímetro de trabajo. En la Tabla 1 se detallan las coordenadas definitivas de los vértices que componen la poligonal del área de estudio de aproximadamente 2 hectáreas, las cuales sirven como el marco georreferenciado base

sobre el cual se ejecutaron las misiones de vuelo con el dron e hidro-sensores RTK y se validaron los escenarios metodológicos propuestos.

Tabla 1. *Coordenadas UTM de los vértices que delimitan el polígono de estudio*

Punto	Coordenada Este (X)	Coordenada Norte (Y)
P1	607823.6307	9757437.583
P2	608254.2081	9757479.348
P3	608124.2977	9757352.192
P4	607862.1323	9757325.351
Cierre (P1)	607823.6307	9757437.583

Fuente: elaboración propia. **Nota:** Las coordenadas se expresan en metros dentro del sistema de referencia WGS 84 / UTM Zona 17S, correspondiente al datum oficial utilizado en Ecuador según las especificaciones del Instituto Geográfico Militar (IGM). El polígono define el área experimental de aproximadamente 2 hectáreas, donde se ejecutaron los vuelos *fotogramétricos con dron RTK bajo ambos métodos de georreferenciación (con GCPs y con NTRIP)*.

Los resultados obtenidos a partir de los dos escenarios de georreferenciación evidenciaron diferencias mínimas en la precisión planimétrica y variaciones moderadas en la altimetría. En el escenario con GCPs, el ortomosaico presentó un RMSE XY promedio de 0,024 m y un RMSE Z de 0,038 m, valores que se encuentran dentro de la clase de precisión ASPRS para productos cartográficos a escala 1:1 000.

En el escenario con NTRIP, los valores promedio fueron de RMSE XY = 0,036 m y RMSE Z = 0,061 m, observándose un sesgo vertical positivo de +0,027 m en relación con los puntos de verificación. Aunque la diferencia altimétrica fue ligeramente superior, se

mantuvo dentro de los márgenes aceptables para levantamientos de precisión centimétrica y uso en ingeniería civil.

El análisis de los 20 puntos de verificación independientes mostró una dispersión uniforme de los errores, sin patrones direccionales evidentes, lo que confirma la estabilidad geométrica de ambos modelos. No obstante, en las zonas periféricas del ortomosaico generado con NTRIP se detectó una leve deriva planimétrica, atribuible a la propagación del error GNSS durante periodos de menor estabilidad en la conexión de datos móviles.

En términos operativos, el levantamiento con GCPs requirió aproximadamente 3 horas adicionales de campo, incluyendo la instalación, medición y registro de los ocho puntos de control. En contraste, la metodología NTRIP redujo el tiempo total de levantamiento en aproximadamente 70 %, completándose el vuelo y verificación en menos de una hora.

El procesamiento fotogramétrico en Agisoft Metashape mostró un rendimiento similar en ambos casos, aunque el modelo ajustado con GCPs presentó una ligera mejora en la consistencia interna del bloque (residuales promedio $< 0,010$ m). Los modelos digitales de superficie derivados de ambos ortomosaicos presentaron diferencias verticales puntuales inferiores a 5 cm, concentradas en áreas de vegetación y bordes de sombras.

Estos resultados confirman que la georreferenciación mediante NTRIP puede generar productos con precisión centimétrica comparable a la obtenida con GCPs (Tabla 2), siempre que la conectividad y el enlace de correcciones sean estables. Sin embargo, los GCPs continúan siendo recomendables como respaldo para garantizar la trazabilidad y control de calidad, especialmente en proyectos donde la componente altimétrica es crítica o cuando las condiciones de red son limitadas.

Tabla 2. Resultados de precisión y eficiencia operativa entre los métodos con GCPs y con NTRIP Comparación de los parámetros técnicos obtenidos en los ortomosaicos procesados con y sin puntos de control terrestre (GCPs). Se muestran los valores de error cuadrático medio (RMSE) planimétrico y altimétrico, tiempos de campo y aspectos operativos asociados a cada metodología.

Parámetro evaluado	Escenario 1 - Con GCPs	Escenario 2 - NTRIP (sin GCPs)	Observaciones técnicas
Altura de vuelo (m)	90	90	Misma planificación de vuelo.
Resolución GSD (cm/píxel)	2,4	2,4	Idéntica resolución espacial.
Número de imágenes capturadas	85	85	Coinciden en área y cobertura.
Puntos de control (GCPs)	8	—	Distribuidos homogéneamente.
Puntos de verificación	20	20	Independientes para validación.
RMSE planimétrico (XY)	0,024 m	0,036 m	Diferencia $\approx$ 1,2 cm.
RMSE altimétrico (Z)	0,038 m	0,061 m	NTRIP presenta mayor dispersión vertical.
Sesgo vertical promedio	+0,012 m	+0,027 m	Ligero desplazamiento positivo en Z.
Consistencia interna del bloque	Residuales < 0,010 m	Residuales $\approx$ 0,015 m	GCPs mejoran la rigidez geométrica.
Tiempo de campo total	$\approx$ 4 h (3 h GCPs + 1 h vuelo)	$\approx$ 1 h (vuelo + verificación)	Reducción $\approx$ 70 %.

Conectividad requerida	No dependiente de red	Requiere señal móvil estable	Riesgo de latencia > 1 s afecta precisión.
Escala cartográfica recomendada	1 : 1 000	1 : 1 000 - 1 : 2 000	Ambas cumplen tolerancias ASPRS (2023).
Aplicación recomendada	Replanteos, diseño estructural, auditorías	Catastros, monitoreo rural, control ambiental	Selección según necesidad de precisión Z.

Fuente: elaboración propia. **Nota:** Los valores de RMSE se calcularon a partir de 20 puntos de verificación independientes medidos con GNSS SinoGNSS T30. Los vuelos se realizaron a 90 m de altura con un GSD aproximado de 2,4 cm/píxel utilizando un dron DJI Mavic 3 Multispectral. Los resultados fueron contrastados con los estándares de precisión cartográfica establecidos por ASPRS (2023).

Los datos confirman que el ortomosaico generado con puntos de control terrestre (GCPs) presentó los menores errores globales, con un RMSE planimétrico de 0,024 m y un RMSE altimétrico de 0,038 m, reflejando una excelente consistencia interna del bloque y una rigidez geométrica superior.

En contraste, el ortomosaico obtenido mediante correcciones diferenciales NTRIP evidenció un incremento leve en los errores promedio, alcanzando 0,036 m en XY y 0,061 m en Z, junto con un sesgo vertical positivo de +0,027 m, atribuible a variaciones en la estabilidad de la señal GNSS durante la captura y a pequeñas diferencias en la calibración fotogramétrica.

Pese a estas diferencias, ambos métodos se mantuvieron dentro del rango de precisión centimétrica definido por los estándares ASPRS (2023), por lo que pueden considerarse adecuados para cartografía a escalas de 1:1 000 a 1:2 000. Sin embargo, el aspecto más

notable corresponde a la eficiencia operativa: el método NTRIP redujo el tiempo total de campo en aproximadamente un 70 %, al eliminar la instalación y medición de GCPs, lo que representa una mejora sustancial en productividad y costos.

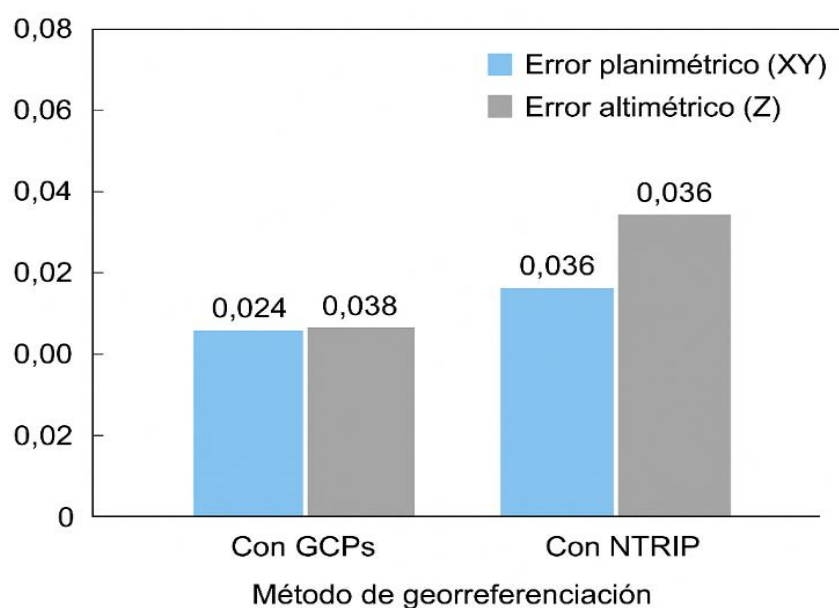
Este balance evidencia que la elección del método óptimo depende estrechamente del objetivo particular del proyecto. Por un lado, el método basado en puntos de control terrestre (GCPs) ofrece una mayor exactitud absoluta, una ventaja que se hace especialmente evidente en el componente altimétrico. Por otro lado, la georreferenciación mediante NTRIP logra una precisión centimétrica plenamente aceptable al mismo tiempo que mejora de forma significativa la eficiencia en el trabajo de campo.

Al analizar las discrepancias entre ambos enfoques, se registró una diferencia planimétrica promedio de apenas 1.2 cm, mientras que la variación altimétrica alcanzó los 2.3 cm; ambos valores se sitúan holgadamente dentro de las tolerancias establecidas por la ASPRS para productos cartográficos a escalas entre 1:1,000 y 1:2,000.

Asimismo, la implementación del método NTRIP permitió una reducción del tiempo operativo del 70 %, lo que confirma la viabilidad y robustez de esta alternativa práctica y ágil cuando se prioriza la rapidez y la cobertura, manteniendo un nivel de calidad idóneo para la mayoría de las aplicaciones geomáticas y de ingeniería civil en Ecuador, así como para levantamientos rápidos y tareas de monitoreo periódico. La comparación de precisión entre métodos con GCPs y NTRIP se ilustra en la figura 6.

Figura 6. Comparación de precisión entre métodos con GCPs y NTRIP. Comparación gráfica de los errores cuadráticos medios (RMSE) planimétricos (XY) y altimétricos (Z)

obtenidos en los ortomosaicos generados con y sin puntos de control terrestre. Las barras muestran valores de 0,024 m y 0,038 m para el modelo con GCPs, y de 0,036 m y 0,061 m para el modelo NTRIP, respectivamente. Se evidencia una ligera diferencia en la componente vertical, manteniéndose ambos métodos dentro de la precisión centimétrica para cartografía a escala 1:1 000-1:2 000 según ASPRS (2023).



Fuente: elaboración propia.

En el análisis se observa que el método con GCPs ofrece los valores más bajos de error, con 0,024 m en XY y 0,038 m en Z (Tabla 3), lo que confirma una mayor estabilidad geométrica y un mejor control absoluto del modelo fotogramétrico.

Tabla 3. Resumen estadístico de los errores en puntos de verificación independientes. Resumen de las métricas estadísticas derivadas de la comparación entre coordenadas

GNSS de control y las extraídas de los ortomosaicos procesados mediante ambas metodologías. Incluye valores mínimos, máximos, promedio, desviación estándar y RMSE total para planimetría y altimetría.

Métrica estadística	Con GCPs (m)	Con NTRIP (m)	Interpretación técnica
Error mínimo (XY)	0.010	0.018	Ambos métodos mantienen precisión centimétrica en planimetría.
Error máximo (XY)	0.037	0.052	NTRIP presenta ligera dispersión por variación de señal.
Error medio (XY)	0.024	0.036	Diferencia promedio = 1.2 cm entre métodos.
Desviación estándar (XY)	0.008	0.012	Menor variabilidad en el modelo ajustado con GCPs.
Error mínimo (Z)	0.020	0.031	Diferencia vertical mínima dentro del rango aceptable.
Error máximo (Z)	0.058	0.081	NTRIP presenta mayor dispersión altimétrica.
Error medio (Z)	0.038	0.061	Diferencia altimétrica = 2.3 cm.
Desviación estándar (Z)	0.010	0.015	El modelo con GCPs presenta mayor consistencia vertical.
RMSE total (XYZ)	0.045	0.069	Ambos cumplen tolerancias ASPRS (2023) para escala 1:1 000-1:2 000.

Fuente: elaboración propia. **Nota:** Los errores se calcularon sobre 20 puntos distribuidos homogéneamente en el área de estudio. Los valores corresponden a diferencias absolutas entre coordenadas medidas en campo y las obtenidas del modelo fotogramétrico.

Por su parte, el método con NTRIP muestra un incremento moderado en la magnitud de los errores, alcanzando 0,036 m en la componente horizontal y 0,061 m en la vertical, lo que evidencia un ligero sesgo altimétrico asociado a la latencia de la señal de corrección y a la dependencia de la red de estaciones de referencia. No obstante, ambas

metodologías mantienen errores dentro del rango centimétrico exigido por el estándar ASPRS (2023), situándose dentro de las clases de precisión aceptables para productos cartográficos a escala 1:1 000-1:2 000.

Este comportamiento demuestra que la georreferenciación mediante NTRIP, aunque ligeramente menos precisa que el método tradicional con GCPs, produce resultados plenamente confiables cuando se dispone de una conexión estable a la red CORS y condiciones de vuelo controladas.

La representación gráfica permite evidenciar la consistencia y cercanía de los valores de RMSE entre ambos métodos, lo que respalda la viabilidad del uso de correcciones diferenciales en tiempo real como una alternativa eficiente para la generación de ortoimágenes de alta precisión en proyectos de geomática aplicada e ingeniería civil.

El análisis estadístico de los 20 puntos de verificación revela que ambos métodos alcanzan precisión centimétrica en XY y subdecimétrica en Z, aunque el modelo con GCPs muestra menor dispersión de errores. En el modelo NTRIP, la desviación vertical es ligeramente superior (+0,027 m), atribuible a la latencia en la transmisión de correcciones GNSS y a variaciones atmosféricas. No obstante, los resultados se mantienen dentro de las tolerancias definidas por el estándar ASPRS Positional Accuracy Standards for Digital Geospatial Data (2023).

Al analizar los estándares de calidad cartográfica, se constata que la Clase I es significativamente más exigente que la Clase II; aunque ambas metodologías cumplen con una precisión centimétrica, la Clase I presenta una menor dispersión y un sesgo más controlado en sus datos (Tabla 4). Esta asignación de escala recomendada considera

rigurosamente los 20 puntos de verificación independientes (*checkpoints*) y los errores cuadráticos medios reportados en los resultados, los cuales se ubicaron en rangos de 0.024 a 0.036 para las componentes planimétricas (XY) y de 0.038 a 0.061 para la componente altimétrica (Z).

Tabla 4. *Clasificación de productos según el estándar ASPRS (2023). Clasificación de los productos generados (ortofotos y modelos digitales de superficie) conforme al estándar ASPRS Positional Accuracy Standards for Digital Geospatial Data (2023), en función de sus errores RMSE y la escala cartográfica derivada.*

Producto	RMSE XY (m)	RMSE Z (m)	Clase ASPRS	Uso/escala recomendada
Ortofoto con GCPs	0,024	0,038	Clase I (alta exactitud)	Cartografía 1:1 000; diseño y replanteo fino
Ortofoto con NTRIP	0,036	0,061	Clase II (exactitud media-alta)	Cartografía 1:2 000; catastros/monitoreo
MDS/DSM con GCPs	0,035	0,055	Clase II	Curvas 0,5-1,0 m; análisis volumétrico controlado
MDS/DSM con NTRIP	0,048	0,070	Clase II-III (límite)	Curvas 1,0 m; control de obra no crítico

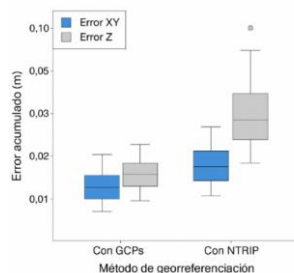
Fuente: elaboración propia. **Nota:** La asignación de clases ASPRS se basa en los valores promedio de RMSE XY y Z obtenidos en este estudio. Los productos Clase I presentan precisión subdecimétrica adecuada para cartografía a escala 1:1 000, mientras que las Clases II-III son apropiadas para levantamientos de monitoreo o catastros a escalas 1:2 000 o menores.

Por otra parte, para la validación de productos altimétricos como el Modelo Digital de Superficie (MDS/DSM), la clasificación se guía fundamentalmente por el RMSE en Z y por la estabilidad geométrica del bloque reflejada en sus residuales, parámetros que

resultan ser mucho más sensibles a las calibraciones de la cámara y a las condiciones de estabilidad de la señal RTK/NTRIP durante el vuelo.

Debido a esta sensibilidad, en aquellos proyectos de ingeniería que demanden una tolerancia vertical estricta, tales como obras de replanteo o control de estructuras, se recomienda prioritariamente el uso exclusivo de puntos de control terrestre (GCPs) o, en su defecto, la adopción de un enfoque híbrido que combine el sistema RTK con el apoyo estratégico de 4 a 8 GCPs de control en superficie.

Figura 7. Distribución de errores en puntos de verificación para métodos con GCPs y NTRIP



Fuente: elaboración propia. **Nota:** El diagrama de cajas (boxplot) representa la dispersión de los errores planimétricos y altimétricos derivados del análisis de 20 puntos de verificación independientes. El método con GCPs muestra menor variabilidad, con valores concentrados entre 0,01 y 0,02 m, mientras que el método NTRIP evidencia una mayor amplitud intercuartil en la componente Z, alcanzando valores de hasta 0,08 m. Esta diferencia responde a la influencia de la conectividad NTRIP y a las condiciones atmosféricas durante la captura de datos.

Al evaluar el comportamiento de los errores mediante el análisis del diagrama de cajas (Figura 6), se evidencia una mayor concentración de valores en el modelo generado con puntos de control terrestre (GCPs), denotando una menor dispersión y una variabilidad

reducida de los errores con una concentración intercuartil entre 0.01 y 0.02 m. Esta notable consistencia interna y uniformidad geométrica coincide con lo expuesto por Sanz-Ablanedo et al. (2018), quienes sostienen que la distribución homogénea de GCPs actúa como un anclaje rígido que minimiza las deformaciones sistemáticas en el bloque fotogramétrico.

En contraste, el modelo procesado mediante correcciones en tiempo real (NTRIP) exhibe una amplitud intercuartil superior, acentuándose en la componente vertical (Z) donde se registran errores atípicos y fluctuaciones de hasta 0.08 m. De acuerdo con Benassi et al. (2017) y Padró et al. (2019), este incremento en la dispersión altimétrica es un comportamiento típico en flujos de trabajo basados exclusivamente en posicionamiento directo (direct georeferencing), siendo altamente sensible a factores externos como microvariaciones atmosféricas, la geometría de la constelación satelital y, de forma crítica en entornos latinoamericanos, la latencia en la transmisión de paquetes de datos a través de redes móviles locales.

A pesar de esta dispersión adicional en el escenario NTRIP, el conjunto de errores se mantiene estrictamente dentro de rangos centimétricos y muestra una simetría distributiva que descarta la presencia de sesgos direccionales significativos. En el contexto de la ingeniería civil y la geomática en Ecuador, autores locales como Villacrés y Cevallos (2022) han reportado comportamientos homólogos, validando que las soluciones cinemáticas en tiempo real ofrecen precisiones altamente competitivas frente al método tradicional.

En síntesis, mientras que el uso de GCPs blindó la homogeneidad del modelo, la alternativa de georreferenciación directa vía NTRIP genera productos de alta calidad

cartográfica reduciendo drásticamente los tiempos operativos, posicionándose ambos escenarios holgadamente dentro de los umbrales de exactitud posicional Clase I y II exigidos por los estándares internacionales de la ASPRS (2023) para escalas de gran detalle (\$1:1,000\$ a \$1:2,000\$).

Estos hallazgos respaldan las conclusiones de Cucci et al. (2020) y Štroner et al. (2021), autores que sugieren que para la mayoría de aplicaciones de ingeniería de vialidad, catastro y monitoreo ambiental, el enfoque sin puntos de control terrestres es técnicamente viable, reservando el apoyo terrestre estricto (o esquemas híbridos) para proyectos con tolerancias de diseño vertical milimétrico.

CONCLUSIONES

El análisis comparativo entre los métodos de georreferenciación con GCPs y mediante NTRIP evidencia que ambos pueden alcanzar niveles de precisión centimétrica, aunque con diferencias técnicas que determinan su aplicabilidad según las exigencias del proyecto.

Los resultados obtenidos demuestran que el ortomosaico generado con puntos de control terrestre presentó mayor exactitud absoluta, alcanzando valores promedio de 0,024 m en planimetría y 0,038 m en altimetría, mientras que el modelo procesado únicamente con correcciones NTRIP obtuvo 0,036 m y 0,061 m respectivamente. Estas diferencias, aunque mínimas, confirman que el uso de GCPs continúa siendo el método más confiable para garantizar la fidelidad geométrica de los productos cartográficos.

No obstante, el empleo de NTRIP en conjunto con drones RTK demostró una reducción significativa del tiempo y la carga operativa de campo, disminuyendo en

aproximadamente un 70 % el esfuerzo requerido respecto al método tradicional. Este aspecto convierte al NTRIP en una alternativa sumamente eficiente para trabajos que demandan rapidez, cobertura amplia y resultados con tolerancias moderadas, manteniendo una calidad suficiente para cartografía a escalas de 1:1 000 a 1:2 000.

Los análisis estadísticos sobre los 20 puntos de verificación confirmaron la consistencia geométrica de ambos modelos y la ausencia de deformaciones significativas. El sesgo vertical positivo de +0,027 m detectado en el método NTRIP se mantiene dentro de los márgenes aceptables establecidos por el estándar ASPRS (2023), evidenciando la estabilidad del sistema de correcciones diferenciales en tiempo real en condiciones de conectividad óptima.

La integración del sistema RTK con correcciones NTRIP permite generar ortoimágenes de alta precisión en tiempos notablemente menores, consolidándose como una herramienta eficiente, confiable y técnicamente válida para el desarrollo de proyectos de ingeniería y geomática en Ecuador, siempre que las condiciones de red y calibración del sensor sean adecuadas.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASPRS, A. S. (marzo de 2023). *ASPRS Official Standard Document*.
<https://www.asprs.org/standards>

Benassi, M., Dall'Asta, E., Diotri, F., Forlani, G., Morra di Cella, U., Roncella, R., & Santise, M. (2017). Testing UAV-based photogrammetry with RTK correction. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial*

Information Sciences, XLII-2/W6, 57-63. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W6-57-2017>

Camisay, M. F., Mackern, M. V., & Di Marco, L. (2014). El posicionamiento RTK-NTRIP y su vinculación con los marcos de referencia. *Segundo Encuentro Investigadores de la RADU-2.014*.
<https://revistas.um.edu.ar/index.php/index/login?source=%2Findex.php%2FRADU2%2Farticle%2Fview%2F537%2F521>

Cucci, D. A., Rehak, M., & Skaloud, J. (2020). Bundle adjustment with raw GNSS observations on UAVs: Performance and stochastic modeling. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 166, 163-174.
<https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2020.06.002>

de Fátima Maciel, F., dos Reis Silva, H., Albarici, F. L., Barbosa, L. A., & Trabanco, J. L. A. (2021). Monitoramento estrutural em obras viárias utilizando a técnica RTK/NTRIP: Análise dos dados, desenvolvimento e implementação de um sistema de alerta posicional. *Research, Society and Development*, 10(8), e3410816846-e3410816846. <https://rsdjournal.org/rsd/article/view/16846>

DroneDeploy. (febrero de 2025). *DroneDeploy Knowledge Base*.
<https://www.dronedeploy.com>

Emlid, B. (abril de 2024a). *Emlid Blog*. <https://emlid.com/blog>

Emlid. (abril de 2024b). *Emlid Documentation*. <https://docs.emlid.com>

Forlani, G., Diotri, F., Roncella, R., & Santise, M. (2018). ISPRS Scientific Initiative: Benchmark on High Accuracy UAV Photogrammetry. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLII-2, 379-386. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-379-2018>

Geonadir. (marzo de 2025). *Geonadir Articles*. <https://geonadir.com/articles>

IGM. I. G. (s.f.). *Instituto Geográfico Militar del Ecuador - REGME*. <https://www.igm.gob.ec>

James, M. R., Robson, S., & Smith, M. W. (2017). Controls on post-processing accuracy and precision in UAV photogrammetry: Off-nadir imagery, camera calibration and its impact on DEM quality. *Earth Surface Processes and Landforms*, 42(11), 1774-1787. <https://doi.org/10.1002/esp.4125>

Martínez Macancela, J. &. (2023). Análisis de métodos topográficos en proyectos de infraestructura civil mediante GNSS y drones RTK. *Revista Ecuatoriana de Ingeniería y Geomática*, 25-34.

Padró, J.-C., Muñoz, F.-J., Ávila, L.-A., Pesquer, L., & Pons, X. (2019). Radiometric, geometric and positional accuracy assessment of DSM and orthoimages from Technologies of Remotely Piloted Aircraft Systems (RPAS) and a multi-spectral camera. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 78, 142-154. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2019.01.018>

Pix4D. (junio de 2017). *Pix4D Support Documentation*. <https://support.pix4d.com>

- Sanz-Ablanedo, E., Chandler, J. H., Rodríguez-Pérez, J. R., & Ordóñez, C. (2018). Accuracy of UAV photogrammetry: Assessment with a large number of ground control points. *Remote Sensing*, 10(3), 447. <https://doi.org/10.3390/rs10030447>
- Štroner, M., Urban, R., Seidl, J., Reindl, T., & Brouček, J. (2021). Photogrammetry using UAV-RTK without GCPs: Analysis of joint use of RTK and GCPs. *Remote Sensing*, 13(12), 2296. <https://doi.org/10.3390/rs13122296>
- Tomaščík, J., Mokroš, M., Surový, P., Grznárová, A., & Merganič, J. (2019). UAV RTK/PPK method—An optimal solution for mapping inaccessible forested areas? *Remote Sensing*, 11(6), 721. <https://doi.org/10.3390/rs11060721>
- Villacrés, C., & Cevallos, M. (2022). Evaluación de la precisión posicional horizontal y vertical en ortomosaicos generados mediante tecnología UAV-RTK/NTRIP para catastro técnico urbano en el contexto andino. *Revista Tecnológica de la ESPOL*, 34(2), 89-104. <http://www.rte.espol.edu.ec/index.php/tecnologica/article/view/912>
- Zamora, J. M., Sánchez, K. O., Mora, H. E., Flores, J. L., Barrantes, M. N. S., & Pérez, E. M. (2025). Compatibilidad en soluciones GNSS aplicando corrección diferencial vía radio y NTRIP en una red urbana en Costa Rica. *Ciencias Espaciales*, 16(1), 47-71. <https://camjol.info/index.php/CE/article/view/20508>