

ANÁLISIS COMPARATIVO DE LA PRECISIÓN GEOESPACIAL EN LEVANTAMIENTOS LiDAR AEROTRANSPORTADOS UTILIZANDO POSICIONAMIENTO PUNTUAL PRECISO (PPP) Y GEORREFERENCIACIÓN CON UN PUNTO GNSS EN EL ÁREA URBANA DEL MUNICIPIO DE VIACHA, LA PAZ, BOLIVIA.

Joel Bautista Choquehuanca

Servicio Nacional de Aerofotogrametría

Correo Electrónico: umsa.bautista@gmail.com

Resumen

A partir de un levantamiento topográfico obtenido con metodología LiDAR aerotransportado tripulado, realizado sobre un polígono de 190 hectáreas en el municipio de Viacha, La Paz, Bolivia, se desarrolló un análisis comparativo de precisión geoespacial entre dos metodologías de georreferenciación, el del Posicionamiento Puntual Preciso (PPP) y la corrección con estación base GNSS. El vuelo fue ejecutado con una aeronave Cessna C-402 equipada con un sensor LiDAR Leica ALS70, a una altura de 1300 metros, en condiciones meteorológicas óptimas. Para el método GNSS, se sesionó durante el vuelo el punto RGVIC-11, previamente ajustado a la Red MARGEN a través de la estación BLPZ del Instituto Geográfico Militar.

Se procesaron dos trayectorias independientes en el software Inertial Explorer, una con el método PPP utilizando efemérides precisas (SP3 y CLK) en modo forward, y otra con corrección diferencial GNSS. A partir de estas trayectorias, se generaron dos nubes de puntos clasificadas en MicroStation V8i. Se realizó un control comparativo de la trayectoria y un muestreo de 300 puntos de la nube de puntos LiDAR ajustado con la estación base GNSS, para evaluar la diferencia altimétrica entre las nubes.

Los resultados evidencian que ambos métodos cumplen con los estándares de precisión para levantamientos topográficos a gran escala. Sin embargo, el método GNSS mostró mayor estabilidad en altimetría. Factores como la geometría satelital, el tiempo de convergencia y la calidad de las efemérides influyeron en la variabilidad de la solución PPP, lo cual es relevante para su futura implementación.

Abstract

Based on a topographic survey obtained using a manned airborne LiDAR methodology, carried out over a 190-hectare polygon in the municipality of Viacha, La Paz, Bolivia, a comparative analysis of the geospatial accuracy of two georeferencing methodologies was conducted: Precise Point Positioning (PPP) and GNSS base station correction. The flight was carried out with a Cessna C-402 aircraft equipped with a Leica ALS70 LiDAR sensor, at an altitude of 1,300 meters, under optimal

meteorological conditions. For the GNSS method, point RGVIC-11 was recorded during the flight, previously adjusted to the MARGEN network via the BLPZ station of the Military Geographic Institute.

Two independent trajectories were processed in Inertial Explorer software: one with the PPP method using precise ephemerides (SP3 and CLK) in forward mode, and the other with differential GNSS correction. From these trajectories, two classified point clouds were generated in MicroStation V8i. Comparative trajectory control and sampling of 300 points from the LiDAR point cloud, adjusted with the GNSS base station, were performed to evaluate the altimetric difference between the clouds.

The results show that both methods meet the accuracy standards for large-scale topographic surveys. However, the GNSS method showed greater stability in altimetry. Factors such as satellite geometry, convergence time, and ephemeris quality influenced the variability of the PPP solution, which is relevant for its future implementation.

Palabras clave

LiDAR, Posicionamiento Puntual Preciso, Red MARGEN, precisión geoespacial, Trayectoria.

1. Introducción

Una de las principales fortalezas de los levantamientos topográficos obtenido a través de la metodología LiDAR aerotransportados es su capacidad para generar modelos digitales del terreno con buena precisión en tiempos operativos reducidos, especialmente en áreas extensas o de difícil acceso. En este contexto, la precisión de los productos generados depende directamente del método de georreferenciación aplicado durante el vuelo.

Actualmente, el Servicio Nacional de Aerofotogrametría utiliza como procedimiento operativo estándar la corrección mediante estaciones GNSS de referencia ajustadas a la red MARGEN, administrado por el Instituto Geográfico Militar, garantizando así la calidad posicional de los datos entregados. No obstante, este método exige el despliegue de personal en campo, la disponibilidad de equipos GNSS y condiciones logísticas adecuadas, lo que en ciertos escenarios puede representar una limitación.

Frente a esta realidad, surge la alternativa del Posicionamiento Puntual Preciso (PPP), un método de posprocesamiento que permite calcular la trayectoria de vuelo de forma autónoma, sin necesidad de estaciones base, utilizando efemérides y productos GNSS globales de alta precisión. Aunque esta metodología no forma parte de los procedimientos operativos actuales del Servicio Nacional de Aerofotogrametría, su aplicación podría representar una solución viable en términos de eficiencia logística y costo operativo.

Por tanto, la presente investigación tiene como objetivo, el de comparar la precisión geoespacial obtenida mediante georreferenciación con estación GNSS frente a la obtenida mediante PPP, a partir de un levantamiento con metodología LiDAR aerotransportado realizado en un área de 190 ha, en el área urbana del municipio de Viacha del departamento de La Paz. A partir de esta comparación, se busca evaluar técnicamente la factibilidad de implementar el PPP como alternativa operativa en proyectos institucionales futuros.

2. Metodología y Desarrollo

Área de estudio

El presente estudio se llevó a cabo en un polígono de aproximadamente 190 hectáreas, ubicado en la zona periurbana del municipio de Viacha, en el departamento de La Paz, Bolivia. El área presenta un relieve predominantemente plano con ligeras ondulaciones, y se caracteriza por un uso mixto del suelo entre urbano y semiindustrial. Las coordenadas geográficas aproximadas del centro del polígono son 16°39'10"S y 68°18'8"O.

Equipos de mensura, punto de apoyo al vuelo y procesamiento de datos geoespaciales

SENSOR Y PLATAFORMA AÉREA:

- **Sensor LiDAR:** Leica Geosystems ALS70
- **Aeronave:** Cessna C-402 (plataforma tripulada)

- **Unidad IMU integrada:** Incluida en sistema ALS70
- **Software de procesamiento de trayectoria:** Inertial Explorer (NovAtel)

SISTEMA GNSS Y PUNTO DE APOYO:

- **Receptor GNSS:** Leica GS08 (doble frecuencia, modo estático)
- **Punto de apoyo al vuelo (PAF):** RGVIC-11, ajustado a estación BLPZ del IGM (Red MARGEN)
- **Intervalo de adquisición GNSS:** 0.5 segundos
- **Efemérides utilizadas para PPP:** SP3 y CLK (descargadas del servicio IGS)

SOFTWARE DE PROCESAMIENTO DE NUBE DE PUNTOS:

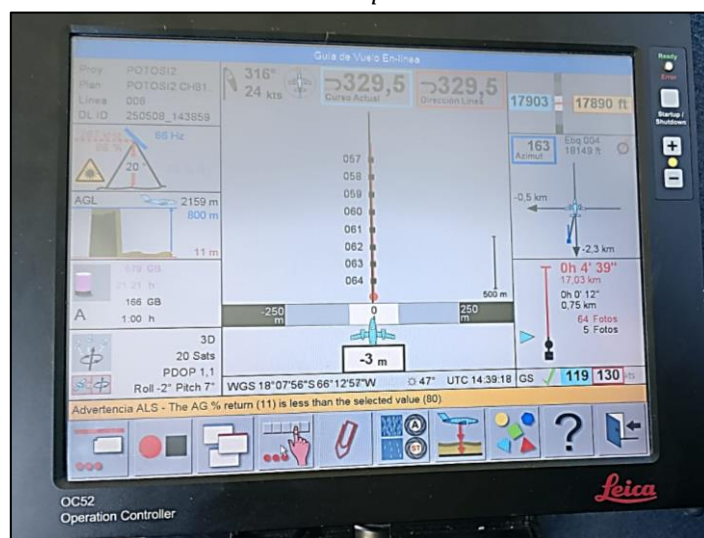
- **Procesamiento y clasificación LiDAR:** Leica Cloud Pro, MicroStation V8i
- **Herramientas de modelado digital del terreno (MDT):** TerraScan de MicroStation.

Sensoramiento aerotransportado.

El levantamiento topográfico con metodología LiDAR, fue ejecutado mediante un vuelo aerotransportado tripulado, utilizando una aeronave Cessna C-402 equipada con un sensor ALS70 de Leica Geosystems, con las siguientes especificaciones operativas:

- Altura de vuelo: 1300 metros sobre el nivel del terreno (AGL)
- Duración del vuelo: 30 minutos
- Número de fajas: 2 (con superposición lateral del 30%)
- Condiciones meteorológicas: cielo despejado, sin nubosidad
- Densidad promedio de puntos: 8 pt/m²
- Ángulo de escaneo: 20°
- Frecuencia de escaneo: 500 kHz

Figura 1: Sensoramiento Remoto Aerotransportado con el sistema LiDAR Leica ALS70



Georreferenciación del punto de apoyo GNSS RGVIC-11

Para garantizar la compatibilidad con el marco de referencia geodésico nacional, se utilizó como punto de apoyo al vuelo la estación RGVIC-11, correspondiente a la Red Geodésica Municipal de Viacha. Este punto fue ajustado previamente a la estación geodésica BLPZ del Instituto Geográfico Militar (IGM), que forma parte de la Red MARGEN del IGM.

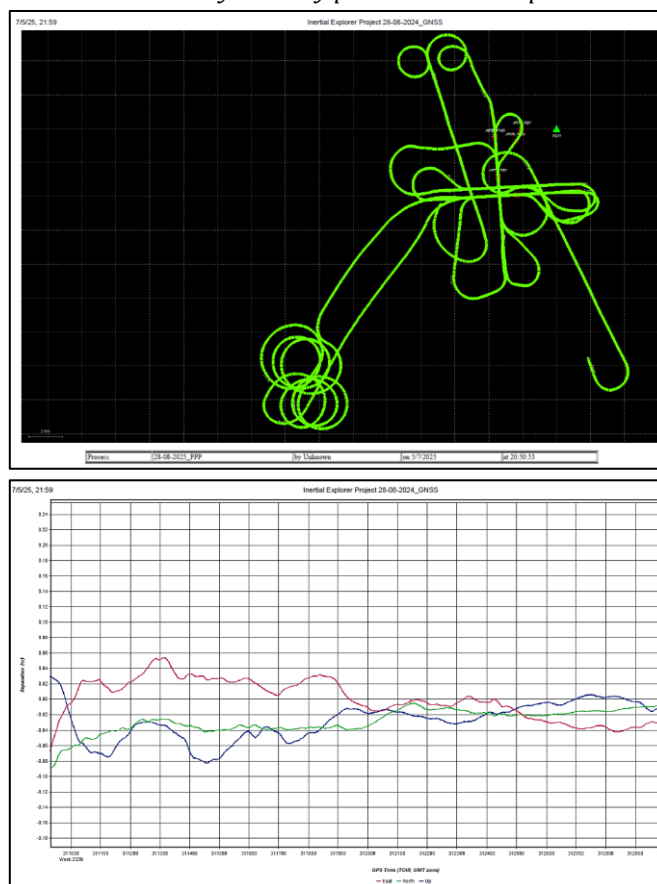
Durante la adquisición de datos LiDAR, el punto RGVIC-11 operó en modo estático durante 2 horas, registrando datos GNSS con receptor de doble frecuencia y almacenamiento continuo, lo que permitió generar un archivo confiable para su uso en la corrección diferencial.

Procesamiento de la trayectoria con estación base GNSS

Los datos GNSS adquiridos a bordo de la aeronave (a un intervalo de 0.5 segundos) fueron sincronizados con la IMU del sensor LiDAR y el reloj GPS del sistema de adquisición.

El procesamiento se realizó en el software Inertial Explorer (NovAtel), generando una solución cinemática diferencial a partir de la referencia RGVIC-11. Esta solución fue utilizada para generar la primera trayectoria georreferenciada y la nube de puntos. La estabilidad de esta solución permitió alcanzar resultados óptimos tanto en planimetría como en altimetría.

Figura 2: *Ajuste cinemático de la trayectoria y precisión XYZ del procesamiento con base GNSS.*



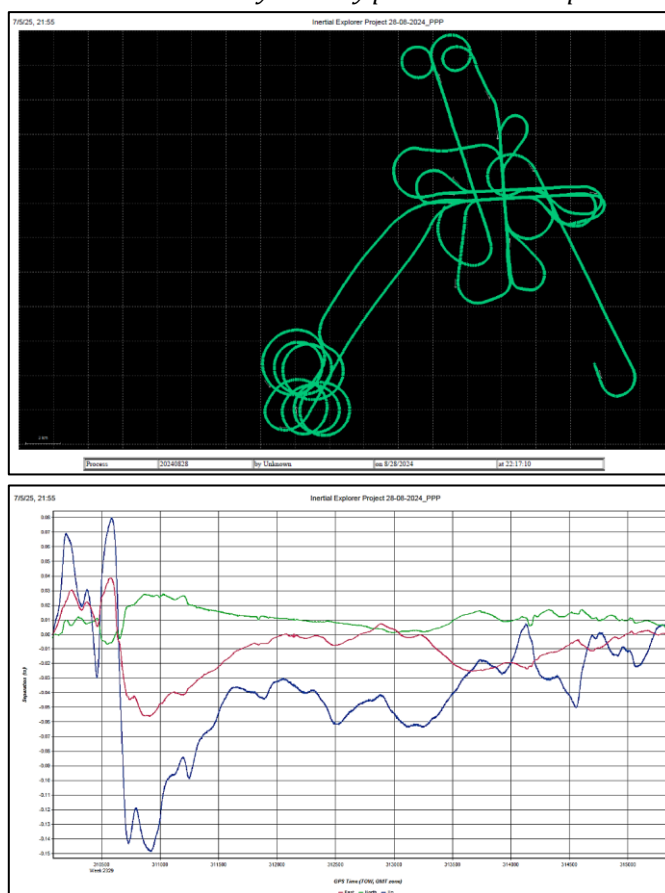
Procesamiento de la trayectoria mediante PPP

Paralelamente, se generó una segunda trayectoria en el mismo software, aplicando el método de Posicionamiento Puntual Preciso (PPP) en modo forward. Este procesamiento se realizó sin el uso de estaciones base local, empleando:

- Efemérides precisas SP3
- Correcciones de reloj CLK
- Sistema de referencia: WGS84

Se evaluó la estabilidad del PPP bajo condiciones reales de vuelo. Con la trayectoria generada, se produjo una segunda nube de puntos georreferenciada para su posterior comparación.

Figura 3: Ajuste cinemático de la trayectoria y precisión XYZ del procesamiento con PPP.



Procesamiento y filtrado LiDAR

Los datos del sensor LiDAR fueron procesados y clasificados en el software MicroStation V8i, aplicando herramientas de filtrado (TerraScan) para separar el terreno de vegetación, estructuras y ruido. A partir de las dos trayectorias (GNSS y PPP) se generaron dos Modelos Digitales del Terreno (MDT) independientes.

Análisis comparativo planimétrico y altimétrico basado en la trayectoria y la nube de puntos

A partir del procesamiento independiente de las trayectorias GNSS y PPP en el software Inertial Explorer, se efectuó un análisis comparativo tanto planimétrico (X, Y) como altimétrico (Z). Estas trayectorias georreferenciadas constituyen la base fundamental para evaluar la precisión posicional de los datos LiDAR generados. El control en tierra, vinculado al punto RGVIC-11 ajustado a la Red MARGEN del IGM, permitió contrastar los resultados obtenidos mediante ambos métodos.

El análisis planimétrico y altimétrico fue realizado directamente sobre la trayectoria registrada por el sistema GNSS a bordo, comparando los resultados con las coordenadas de referencia. Este proceso permitió identificar variaciones en la posición calculada de la aeronave y evaluar la estabilidad de la solución PPP respecto al método tradicional basado en estación base.

Complementariamente, se desarrolló un análisis altimétrico sobre las nubes de puntos generadas. En este caso, se utilizó la nube de puntos LiDAR enlazada a la estación GNSS (19.067.893 puntos) como modelo de referencia, y se aplicó un muestreo aleatorio de 300 puntos, cuyos valores de altura fueron comparados con los correspondientes en la nube PPP. Este proceso permitió medir la consistencia vertical del modelo LiDAR PPP en condiciones operativas reales.

3. Resultados

Diferencias obtenidas del control de trayectoria GNSS vs PPP

El control de trayectoria comparó las soluciones cinemáticas GNSS (con estación base RGVIC-11) y PPP (modo forward) respecto al punto de apoyo geodésico ajustado. Se obtuvieron los siguientes valores:

Tabla 1: *Diferencia de trayectoria GNSS vs PPP*

Método	Diferencia en X (m) (mín/máx)	Diferencia en Y (m) (mín/máx)	Diferencia en Z (m) (mín/máx)
GNSS	+0.06 / -0.06	+0.06 / -0.01	+0.01 / -0.06
PPP	+0.04 / -0.06	+0.03 / -0.01	+0.08 / -0.15

Análisis altimétrico entre nubes de puntos (GNSS vs PPP)

A partir de una muestra de 300 puntos extraídos de la nube de puntos generada con el método GNSS (19.067.893 puntos), se realizó una comparación altimétrica con los valores correspondientes en la nube generada con PPP. El resultado del análisis estadístico, procesado en MicroStation V8i (TerraScan), se presenta en la siguiente tabla:

Tabla 2: *Diferencia altimétrica entre nubes de puntos (GNSS vs PPP)*

Parámetro	Valor (m)
Diferencia media Z (Average dz)	+0.157
Diferencia mínima Z (Minimum dz)	+0.010
Diferencia máxima Z (Maximum dz)	+0.250

Parámetro	Valor (m)
Magnitud media de la diferencia (Average magnitude)	0.157
Error cuadrático medio (RMSEz)	0.160
Desviación estándar (Std Dev)	0.029

Estos resultados reflejan una diferencia altimétrica sistemática de aproximadamente 15.7 cm entre ambas nubes, con una dispersión baja ($\sigma = 2.9$ cm), lo cual indica buena consistencia interna del modelo PPP, aunque con un sesgo vertical respecto al modelo generado con estación base GNSS.

4. Discusión

El análisis del ajuste cinemático de las trayectorias GNSS y PPP evidencia que ambos métodos ofrecen resultados técnicamente confiables. La trayectoria generada con estación base GNSS mostró diferencias máximas de ± 0.06 m en X, ± 0.06 m en Y, y entre $+0.01$ m y -0.06 m en Z. Por su parte, el método PPP presentó una mayor variación vertical, con diferencias entre $+0.08$ m y -0.15 m. Esto confirma que el ajuste con estación GNSS ofrece una mayor estabilidad posicional, al estar vinculado a un punto de control geodésico ajustado (RGVIC-11), en contraste con el PPP, que depende de factores como la convergencia satelital y la calidad de las efemérides.

En cuanto a la comparación altimétrica entre las nubes de puntos generadas, se observó una diferencia media de $+0.157$ m y un RMSE de 0.16 m en Z, entre la nube PPP y la GNSS, con una desviación estándar baja de 0.029 m. Esto indica que, si bien la nube generada con PPP es internamente consistente, presenta un sesgo vertical sistemático respecto al modelo de referencia. Este comportamiento es congruente con estudios previos (De La Cruz, 2019; USGS, 2022), los cuales señalan que el PPP, en ausencia de puntos de control, tiende a conservar precisión relativa, pero puede presentar desplazamientos absolutos en altitud.

Una de las principales limitaciones identificadas en este estudio es la utilización de un único punto de control GNSS (RGVIC-11) para la validación, lo que impide verificar la precisión en otras zonas del polígono. En caso de incluirse puntos GNSS distribuidos y sesionados adecuadamente dentro del área de estudio, sería posible mejorar significativamente la validación altimétrica y planimétrica de ambas nubes de puntos. Asimismo, el procesamiento PPP fue realizado únicamente en modo forward, sin emplear una solución combinada (forward + backward), lo cual podría haber reducido parte de la variabilidad vertical observada.

5. Conclusiones

La presente investigación permitió comparar la precisión geoespacial obtenida mediante dos métodos de georreferenciación aplicados a un levantamiento LiDAR aerotransportado, la corrección diferencial con estación base GNSS (RGVIC-11) y el Posicionamiento Puntual Preciso (PPP). Ambos métodos fueron evaluados a partir del ajuste cinemático de la trayectoria y la generación de nubes de puntos independientes, permitiendo un análisis cuantitativo de sus diferencias.

En cuanto a la trayectoria, el método GNSS presentó una mayor estabilidad tanto en planimetría como en altimetría, con variaciones máximas de ± 0.06 m, mientras que el PPP mostró una mayor

dispersión vertical, con diferencias entre +0.08 m y -0.15 m. En la comparación altimétrica de la nube de puntos, se identificó una diferencia media de +0.157 m y un RMSE de 0.160 m entre la nube PPP y la de referencia GNSS, con una desviación estándar baja de 0.029 m.

Estos resultados son consistentes de acuerdo a los parámetros de precisión vertical absoluta establecido en la Especificación Base LiDAR (LBS) v2.1 del Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS, 2019), la cual establece, para el nivel de calidad QL3, un RMSEz máximo de 20 cm en superficies no vegetadas. El RMSEz obtenido en esta investigación (16.0 cm) se encuentra dentro de dicho parámetro, confirmando que el método PPP cumple con los criterios mínimos exigidos por esta especificación para aplicaciones topográficas.

Paralelamente, conforme a los estándares establecidos por la Sociedad Americana de Fotogrametría y Teledetección (ASPRS, 2014), los productos LiDAR se evalúan en función de su precisión vertical mediante el error cuadrático medio vertical (RMSEz) y su nivel de confianza del 95%, correspondiente al NVA (Non-Vegetated Vertical Accuracy). Según estos parámetros, un RMSEz igual o inferior a 18.5 cm, que corresponde a un NVA aproximado de 36.3 cm, es considerado adecuado para trabajos topográficos estándar. Bajo este parámetro, el RMSEz de 16.0 cm, obtenido en esta investigación en superficies no vegetadas se encuentra dentro de los límites establecidos.

En base a los resultados y la investigación realizada, se confirma que el método PPP es una alternativa operativamente viable en contextos donde no se dispone de estaciones base, permitiendo generar datos de alta calidad con menor logística. No obstante, su implementación debe considerar la necesidad de puntos de control distribuidos para validar y ajustar posibles desplazamientos sistemáticos. Para futuras investigaciones, se recomienda evaluar el uso combinado de PPP (forward + backward), así como incorporar múltiples puntos GNSS de control para verificar la precisión global del modelo generado.

Referencias

American Society for Photogrammetry and Remote Sensing. (2014). ASPRS positional accuracy standards for digital geospatial data. https://www.asprs.org/wp-content/uploads/2015/01/ASPRS_Positional_Accuracy_Standards_Edition1_Version100_November2014.pdf

De La Cruz Huamani, W. J. (2019). Análisis e implementación de levantamiento topográfico por método LiDAR para proyectos viales, modelamiento de superficie y validación de cálculos con Precise Point Positioning (PPP). Tesis de licenciatura, Universidad Nacional Federico Villarreal. Repositorio Institucional UNFV. <https://repositorio.unfv.edu.pe/handle/20.500.13084/3983>

International GNSS Service (IGS). (2024). IGS Products: Final Orbits and Clock Corrections. <https://www.igs.org/products/>

Instituto Geográfico Militar. (2023). Red Geodésica Nacional - Red MARGEN. La Paz, Bolivia. <https://www.igm.gob.bo>

Leica Geosystems. (2020). ALS70 Airborne LiDAR System – Technical Specifications. Leica Geosystems AG. <https://leica-geosystems.com>

NovAtel Inc. (2021). Inertial Explorer Software Documentation. <https://www.novatel.com/products/waypoint-software/inertial-explorer/>

U.S. Geological Survey. (2019). Lidar base specification version 2.1. U.S. Department of the Interior. <https://www.usgs.gov/media/files/lidar-base-specification-version-21>