

Evaluación de la exactitud posicional de imágenes Google Earth en zonas de Brasil para aplicaciones cartográficas

Evaluation of the positional accuracy of Google Earth images in areas of Brazil for cartographic applications

Orlando Francisco Cristiano¹

Bias Edilson de Souza²

Elieth Alina Hoyos Montoya³

María Fernanda León Pazmiño⁴

Recibido 4 de agosto 2021; aceptado 2 de marzo de 2022

RESUMEN

La demanda de documentos cartográficos por parte de la sociedad que creció en todo el mundo, incluido Brasil. El avance de las geotecnologías asociadas a la publicación de datos de forma gratuita permite que cada vez sea más accesible esta adquisición, ya que actualmente, es posible utilizar imágenes, incluso de alta resolución de esta forma; por ejemplo, las imágenes de la plataforma Google Earth. El objetivo del presente estudio es evaluar la exactitud posicional de estas imágenes. Las áreas de estudio fueron seleccionadas mediante el proceso de muestreo aleatorio, haciendo la selección de un estado por región. Los estados seleccionados fueron Alagoas (noreste), Río de Janeiro (sureste), Santa Catarina (sur), Goiás (centro-oeste) y Tocantins

¹ Instituto de Geociências (IGD), Universidade de Brasília (UnB), Brasília, Brasil, correo electrónico: francisco.orlando.unb@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6664-7902>

² Instituto de Geociências (IGD), Universidade de Brasília (UnB), Brasília, Brasil, correo electrónico: edbias@unb.br. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0334-0476>

³ Universidad Nacional Abierta y a Distancia (UNAD), Bogotá, Colombia, correo electrónico: elieth.hoyos@unad.edu.co. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3170-337X>

⁴ Instituto Geográfico Militar, Quito, Ecuador, correo electrónico: fernanda.leon@geograficomilitar.gob.ec. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7766-0109>

(norte). Fueron utilizados puntos de control medidos en el campo con el uso de GNSS para evaluar la exactitud posicional. Los resultados obtenidos en el presente estudio indican que la imagen proporcionada por la plataforma Google Earth tiene una exactitud posicional compatible con la escala de 1:25 000 clase B del EPC (Estándar de Precisión Cartográfica) de Brasil, lo que indica su uso solo para mapeos en la escala de 1:25 000.

Palabras clave: Google Earth, *Precisión posicional*, *Estándar de precisión cartográfica*, *Resoluciones espaciales*.

ABSTRACT

The demand on the part of the society of cartographic documents has grown all over the world, including Brazil. The advance of geotechnologies associated with the publication of data free of charge allows this acquisition to be more accessible. Now it is possible to use high resolution images, for example, the images of the Google Earth platform. The goal of this study is to evaluate the positional accuracy of the images from the Google Earth platform for selected applications. The study areas were selected through the random sample process, making the selection of a state by region. The selected states were in Alagoas (northeast), Río de Janeiro (southeast), Santa Catarina (south), Goiás (central-west) y Tocantins (north). Control points measured in the field with GNSS were used to evaluate the positional accuracy. The results obtained in this study indicate that the image provided by the Google Earth platform has a positional accuracy compatible with a scale of 1:25 000 class B of the EPC (Standard of Cartographic Precision) of Brazil, which indicates its solo use for mapping in on the scale of 1:25 000.

Key words: Google Earth, *Positional Accuracy*, *Cartographic Accuracy Standard*, *Spatial Resolutions*.

1. Introducción

Según Cruz *et al.* (2012), en los últimos tiempos se ha comprobado un aumento significativo de los sensores de mapeo con el fin de permitir la extracción de información de la superficie terrestre. También hay una mayor cantidad de *hardware* y *software* cada vez más eficientes para la generación de productos, cartografía de mejor calidad, optimización de recursos visibles en su captura más rápida y a menor costo, debido a la disponibilidad de imágenes gratuitas y también orto rectificadas, como los datos —Sentinel, CEBERS, entre otras.

La plataforma Google Earth, lanzada en junio de 2005, fue inicialmente llamada Earth Viewer. Ha sido desarrollada por Keyhole, y combina imágenes de satélite con características del terreno. La aceptación del uso de esta plataforma para 2008, alcanzó la cifra de 350 millones de instalaciones (Souza Lima, 2012).

Los estudios realizados por Liang *et al.* (2018) al analizar publicaciones que involucran los productos de la plataforma Google Earth desde su lanzamiento,

identificaron más de 2,115 registros de trabajo, que abarcan 26 áreas temáticas de “Scopus”, teniendo su mayor concentración en geociencias y teledetección.

Para realizar una evaluación de la calidad posicional en una imagen satelital, es necesario efectuar la ortorrectificación, que consiste en la eliminación de las imperfecciones existentes en la imagen en bruto y de la inestabilidad de la plataforma donde se ubican los sensores. Para la realización del proceso se utiliza un MDE (Modelo Digital de Elevación), que resulta de la corrección en la imagen de las influencias topográficas del relieve.

Los estudios de Höhle y Pedersen (2010) y Mozas *et al.* (2013), señalan que es en zonas de alto relieve donde se producen las mayores distorsiones tanto en planimetría como en altimetría. Según Höhle y Pedersen (2010), errores planimétricos de mayor magnitud pueden propagarse y generar errores altimétricos en áreas inclinadas.

Para una evaluación de datos espaciales en áreas con grandes variaciones topográficas, son necesarios puntos de control (*Ground Control Points* —GCP). Se requiere un mayor número de GCP en áreas con relieve accidentado. Como un indicador importante para la evaluación de datos espaciales que no siguen la distribución normal es la cantidad de puntos de control utilizados en el análisis. En el presente estudio no fue posible densificarlos debido a la falta de un mayor número de puntos de apoyo disponibles en el IBGE, por lo que el criterio utilizado en esta evaluación fue el indicado por el estándar norteamericano (NSSDA) y por Merchant (1982), que indica 20 GCP.

Sin embargo, cabe señalar que Ariza *et al.* (2010) analizaron grupos de puntos de control variando la cantidad hasta un total de 500 puntos y sugirieron un uso mínimo de 100 puntos, ya que a partir de esta cantidad observaron el comportamiento estable del RMSE. Ellos señalan también que el tamaño de la muestra influye directamente el riesgo de aceptación del producto inadecuado o rechazo de un producto de calidad, ya que los resultados estadísticos difieren según el tamaño de la muestra, logrando la estabilidad de la curva a partir de un cierto número de puntos. El estudio de Vaz Menezes *et al.* (2019), citando a Bravo y Sluter (2015), Ariza (2002), Nogueira (2003), Santos (2010) enfatiza los aspectos de estandarización desarrollados por la Organización Internacional de Normalización (ISO) para la adecuación de las evaluaciones de la calidad de los datos espaciales. Ellos informan que, entre los elementos presentes en el control de calidad, la exactitud posicional es uno de los más estudiados y evaluados.

Para autores como Galo y Camargo (1994), Tommaselli *et al.* (1988) y Merchant (1982) la evaluación de la exactitud posicional basada en el análisis de discrepancias entre coordenadas, señala que los puntos de referencia deben presentar una incertidumbre menor a un tercio del error estándar esperado para el producto.

Cabe señalar que la evaluación de la exactitud de los productos cartográficos en Brasil sigue los lineamientos del Decreto N ° 89.817 (Brasil, 1984) que clasifica un producto en tres clases: A, B y C, con base en las tolerancias para una escala dada.

Según estudios de Merchant (1982), el análisis de la exactitud cartográfica planimétrica y altimétrica se basa en dos etapas: análisis de tendencias (errores

sistemáticos) y análisis de exactitud (errores aleatorios). Existen estándares tanto para el análisis de tendencias como para el análisis de exactitud. El error sistemático es fácil de identificar porque se trata de un valor de discrepancia constante en una dirección dada. Entre las posibles causas del error sistemático se destacan la falta de mantenimiento, calibración de los equipos de medición, o incluso el uso de parametrizaciones inadecuadas en el modelo matemático utilizado en la generación del producto, mientras que el error aleatorio no sigue patrones y son inherentes al producto.

El Decreto No. 89.817, del 20 de junio de 1984 del Gobierno brasileño, estableció criterios para la clasificación de las cartas en cuanto a su exactitud y la distribución de errores a lo largo de ellas. Para ello se utiliza un indicador estadístico de calidad posicional, denominado “Estándar de Precisión Cartográfica (EPC)”. Por consiguiente, la clase A corresponde al 90% de los puntos con discrepancias por debajo de 0,5 mm en la escala del gráfico, mientras que la clase B corresponde a 0,8 mm en la escala del gráfico y la clase C a 1 mm en la escala del gráfico. Este mismo decreto establece que para garantizar la probabilidad del 90% de los datos, se multiplicó el error estándar por 1 6449 generando el límite de error aceptable, y que el error estándar aislado en un trabajo cartográfico, no debe exceder el 60.8% del Estándar de Precisión Cartográfica (EPC).

De acuerdo con la Organización Internacional de Normalización (ISO 19113, 2002), la calidad de los datos es la totalidad de características de un producto capaz de satisfacer necesidades explícitas e implícitas.

Lousada y Fernandes (2017) indican que es posible mejorar la calidad de un documento cartográfico excluyendo el error sistemático obtenido en el análisis de tendencias. Según Ferreira (2019), Carvalho y Silva (2018), el análisis de tendencias mediante el método de prueba “t” de Student y la identificación de compatibilidad de escalas mediante el método Chi-Cuadrado solo ocurrirá si los datos de discrepancia tienen su distribución normal. Debido a esta condición, el Decreto 89.817 del Gobierno brasileño establece una metodología basada en estadísticas, donde, para evaluar un producto cartográfico no es necesario que los datos tengan su distribución normal como sí lo exige la norma ASPRS.

Con el objetivo de respaldar la evaluación de datos que no tienen una distribución normal, como suele ser el caso, el estándar brasileño se basó en determinar un método que sería efectivo en la evaluación de datos que incluyen distribución normal o no. Así, el método adoptado por las instituciones brasileñas (IBGE y DSG), difiere de algunos estándares internacionales, como el ASPRS, que requiere que los datos se distribuyan normalmente.

Carvalho y Silva (2018) afirman que, con base en los resultados obtenidos por el estudio, la evaluación de un documento cartográfico no debe realizarse analizando la tendencia y exactitud si los datos no tienen su distribución normal, por lo que se recomienda el uso de estándares internacionales que contemplan la distribución normal. Este mismo estudio recomienda el uso de diferentes métodos de validación para evaluar modelos digitales.

Muchas instituciones públicas y privadas utilizan los datos de la plataforma Google Earth debido a su resolución espacial, sin siquiera conocer la exactitud posicional de esa imagen.

La plataforma Google Earth proporciona un mosaico para la sociedad, con correcciones realizadas al conjunto de imágenes. Los errores geométricos pueden extenderse a imágenes adyacentes, con mayor o menor incidencia debido a una variedad de factores: número de puntos de apoyo, su distribución, condiciones topográficas, etc. Según Silva y Nazareno (2009), la plataforma Google Earth proporciona imágenes georreferenciadas con una proyección de perspectiva general, que es similar a la proyección ortográfica, excepto que el punto de perspectiva se encuentra a una distancia finita de la superficie en lugar de al infinito.

Silva y Nazareno (2009) al evaluar la calidad posicional de los datos disponibles en la plataforma Google Earth, realizaron un análisis comparativo entre los datos recolectados en campo con un sistema de posicionamiento satelital y los datos de la plataforma referida, señalando que las discrepancias encontradas varían a lo largo del globo.

Oliveira *et al.* (2009) evaluaron la utilización de imágenes Google Earth para el municipio de São Leopoldo / Rio Grande do Sul, y concluyeron que las imágenes no tienen tendencias y la exactitud es compatible con la escala 1:15 000 clase B del Estándar de Precisión Cartográfica utilizado en Brasil.

Sin describir si ocurrió una observación más detallada de las condiciones topográficas del terreno, Zomrawi *et al.* (2013) realizaron análisis para estimar la exactitud horizontal y vertical del producto en la capital de Sudán (Cartun), utilizando 16 GCP y, como resultado, un RMSE horizontal de 1,59 m y 1,7 m vertical.

Otro estudio se realizó en el Campus de la Universidad King Saud (Arabia Saudí), para analizar la exactitud horizontal de la plataforma Google Earth, concluyendo que es compatible con la escala 1:50 000, con un error horizontal en el rango de 4,71 m a 12,50 m y error medio de 6,84 y RMSE de 2,18 m. El error vertical encontrado fue de 0,30 m y el RMSE de 1,51 m (Farah y Algarni, 2014).

Según estudios de Soares *et al.* (2010), al evaluar la imagen de la plataforma Google Earth en el área urbana de Pato Branco, Paraná, mediante la prueba Chi-Cuadrado, identificaron la presencia de un error sistemático y luego de su eliminación, la imagen mostró compatibilidad para escala 1:30 000 clase A, del Estándar de Precisión Cartográfica utilizado en Brasil.

Vaz *et al.* (2019) al evaluar la calidad posicional de las imágenes de Google Earth para la producción de base cartográfica digital, concluyeron que luego de la eliminación del error sistemático obtuvieron una clasificación compatible con el Estándar de Precisión Cartográfica clase A para la escala de 1:25 000 y clase B para la escala 1:10 000.

En vista del potencial de las imágenes de Google Earth en la producción de datos geoespaciales, este estudio tiene como objetivo evaluar la exactitud posicional e identificar la compatibilidad de la escala con los productos generados para el mapeo sistemático brasileño según el Decreto Presidencial 89.817 de 1984. No se realizará ningún procedimiento de ortorrectificación.

En los estudios de Ariza *et al.* (2010) utilizando el método de evaluación ASPRS, se evalúa el riesgo del usuario de aceptar un mal producto y el riesgo del productor de que su producto sea rechazado con calidad, clasificando la calidad por rangos en función de la desviación estándar, relacionada al grado de confiabilidad del producto.

Para que un mapa se clasifique como Clase 1 debe tener un 99% de confianza. Para la clase 2, 95% de confianza y finalmente para la clase 3 solo 66%. Estos últimos están destinados únicamente a la visualización y no requieren de una alta precisión.

Sin embargo, la norma brasileña también utiliza rangos para definir la calidad de un producto, pero no en función del grado de confianza, sino en función de la probabilidad de que los datos representen el 90% del producto. Para la misma escala, hay clases que varían en función del valor del EQM (Error Cuadrático Medio).

Zanetti *et al.* (2018) realizaron una comparación entre estándares internacionales (ASPRS —American Society for Photogrammetry and Remote Sensing y STANAG —Standardization Agreement) analizando la precisión posicional de productos cartográficos con el estándar brasileño, concluyendo que los métodos son muy similares.

2. Área de estudio

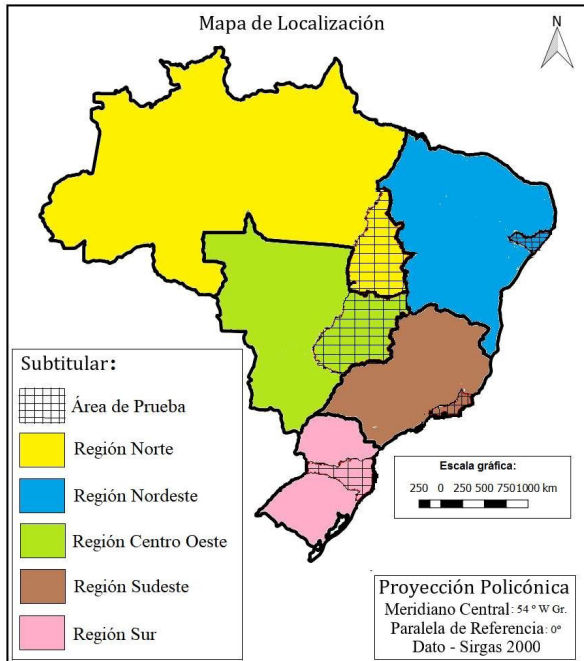


Figura 1. Mapa de localización de las áreas de estudio.
Fuente: elaborado por el autor, límites regionales elaborados por IBGE.

La selección de áreas para la evaluación de la plataforma Google Earth se realizó mediante un proceso de muestreo aleatorio, utilizando la herramienta del programa Qgis 3.14, con un Estado seleccionado por región de Brasil. La Figura 1, ilustra las áreas de estudio.

Las áreas seleccionadas para este estudio fueron los Estados de Alagoas, Tocantins, Goiás, Santa Catarina y Río de Janeiro, contemplando diferentes configuraciones de terreno y observando las clases de talud oficial de Brasil elaboradas por el Servicio Geológico de Brasil (CPRM). Las características de las Regiones de Brasil se muestran en el Tabla 1.

Tabla 1. Porcentaje de presencia de clases de pendiente por región

<i>Clases de pendientes</i>	<i>Región Sur</i>	<i>Región Sudeste</i>	<i>Región Centro-Oeste</i>	<i>Región Nordeste</i>	<i>Región Norte</i>	<i>Brasil</i>
Plano	23,88%	20,29%	50,88%	45,94%	49,02%	43,73%
Suave ondulado	34,58%	33,02%	36,61%	33,21%	34,06%	34,31%
Ondulado	29,53%	28,90%	10,02%	15,13%	13,30%	15,93%
Forte ondulado	11,28%	15,84 %	2,29%	5,28%	3,38%	5,49%
Montañoso	1,14%	1,78%	0,19%	0,41%	0,22%	0,5%
Escarpado	0,08%	0,16%	0,01%	0,02%	0,01%	0,04%

Fuente: elaborado por el autor con base en el mapa de pendiente elaborado por CPRM.

Las características predominantes de los estados seleccionados para el presente estudio se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2. Característica predominante de la topografía

<i>Estados</i>	<i>Santa Catarina</i>	<i>Rio de Janeiro</i>	<i>Alagoas</i>	<i>Tocantins</i>	<i>Goiás</i>
Clase pendiente predominante	Fuertemente ondulado	Fuertemente ondulado	Plano	Suave ondulado	Ondulado

Fuente: elaboración propia con base en el mapa de pendiente elaborado por CPRM.

3. Materiales y métodos

La estructura metodológica de la presente investigación se trabajó de la siguiente manera (Figura 2):

1. Primero se seleccionaron las áreas de estudio de forma aleatoria —un Estado para cada región de Brasil.
2. Para cada Estado seleccionado, los datos geodésicos fueron obtenidos por IBGE por medio de GNSS.
3. Los datos en formato shapefile, fueron convertidos al formato “KML” y superpuestos en la plataforma Google Earth.

4. Después se seleccionaron los puntos de control fotoidentificables, con la distribución más homogénea posible (equidistantes) en las imágenes de la plataforma Google Earth según la existencia de datos IBGE.
5. A continuación, se calcularon las discrepancias, comparando las coordenadas de puntos medidos con GNSS y su contraparte de la plataforma Google Earth, así como el cálculo del error cuadrático medio, la determinación del CE90 (90% de los puntos bien definidos en un mapa, cuando se prueban en el suelo, no deben presentar un error mayor que el Estándar de Precisión Cartográfica-Planimétrico–establecido y su clasificación).
6. Finalmente, el análisis de tendencias y la prueba de Chi-Cuadrado para identificar la escala del producto.

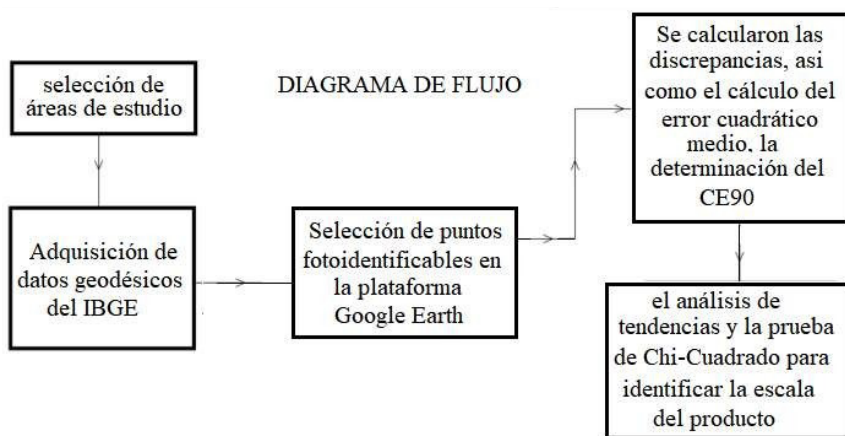


Figura 2: Flujo metodológico.

Fuente: elaborado por el autor.

En el desarrollo de este estudio, de acuerdo con la Figura 2, se utilizaron puntos de las instituciones oficiales responsables del mapeo sistemático del territorio brasileño IBGE (Instituto Brasileño de Geografía y Estadística) y la DSG (Dirección del Servicio Geográfico del Ejército) para identificar la escala de los productos generados a partir de los datos de la plataforma Google Earth.

Para los análisis en cada una de las áreas seleccionadas se observaron diferentes condiciones topográficas y se aplicaron los procedimientos metodológicos de análisis de calidad cartográfica EPC (Estándar de Precisión Cartográfica), con el fin de cumplir con la confiabilidad estadística. El 90% de los puntos bien definidos, cuando son medidos en el campo, no deben presentar discrepancias mayores que el EPC para la clase y escala probadas, y que el valor RMS de la muestra de discrepancias sea igual o menor que el valor de Error Estándar (EE) establecido para la escala y clases probadas.

Los GCP utilizados en esta investigación, fueron obtenidos de la base de datos del IBGE, recolectados en todo el territorio brasileño con la utilización de

GNSS y corregidos por el método PPP – Posicionamiento de Punto Preciso. El mismo es un método de posicionamiento del sistema de navegación por satélite que calcula posiciones muy precisas con errores de apenas unos centímetros.

Existen varios estudios (Ariza y Atkinson, 2008; Ariza *et al.*, 2010; IBGE, 2010; NMAS, 1947; NSSDA, 1998; Merchant, 1982) sobre la determinación del número mínimo de GCP necesarios para la evaluación de un producto cartográfico.

Sin embargo, debido a la cantidad de los puntos cedidos por el IBGE y por la imposibilidad de realizar actividades de campo para recolectar nuevos puntos, fueron utilizadas las recomendaciones NMAS y NSSDA de exactitud posicional, con un mínimo de 20 puntos de control.

Una vez definido el número de GCP a utilizar en el proceso de evaluación, se identificaron aquellos que cumplían la condición de ser fotointerpretables en imágenes de Google Earth.

Se eligieron veinte GCP por Estado para su uso en el presente estudio. La selección de los GCP se realizó de tal manera que los puntos se distribuyeron de la forma más equidistante posible y el método utilizado en este procedimiento fue el método estratificado. La Figura 3, ilustra la distribución de los GCP.



Figura 3. Distribución de GCP en estados seleccionados.

Fuente: elaborado por el autor sobre la plataforma Google Earth.



Figura 4. a, b, c, d, ejemplos de puntos seleccionados en la evaluación de Google Earth.
Fuente: elaborado por el autor sobre la plataforma Google Earth.

Para realizar la normalización, todos los datos fueron convertidos a proyección cartográfica UTM y al sistema de referencia SIRGAS 2000, a través del programa TCGeo desarrollado por IBGE. La Tabla 3 muestra las coordenadas de algunos GCP pertenecientes al estado de Río de Janeiro.

Tabla 3. Ejemplos de coordenadas de los puntos seleccionados para evaluación (GNSS-IBGE x plataforma Google Earth) , estado de Río de Janeiro

Puntos de control	E_GNSS	N_GNSS	E_Google Earth	N_Google Earth
1	5535501,88	7513183,33	553506,21	7513185,23
...
5	650052,21	7487200,03	650058,62	7487203.42
...
20	777807,96	7573598,99	777806.35	7573606,74

Fuente: elaborado por el autor.

El siguiente paso fue calcular las discrepancias entre las coordenadas obtenidas en la imagen de Google Earth y las coordenadas en los puntos homólogos obtenidos por las mediciones GNSS. Para realizar este paso se aplicó la Ecuación 1.

$$\Delta d_i = \sqrt{\Delta E_i^2 + \Delta N_i^2}$$

(1)

donde ΔE es la diferencia entre las coordenadas del componente E , y ΔN es la diferencia entre las coordenadas del componente N .

siendo:

- $\Delta Ei = E_{GoogleEarth} - E_{GNSS}$
- $\Delta Ni = N_{GoogleEarth} - N_{GNSS}$

Luego de obtener los valores de las discrepancias en cada punto fotoidentificable, se calculó el Error Estándar y se determinó el CE90 para cada Estado seleccionado, clasificando el Estándar de Precisión Cartográfica de acuerdo con el Decreto presidencial 89.817 de 1984 presentado en la Tabla 4.

Tabla 4. Estándar de Precisión Cartográfica

EPC		Escala			
Clases	Parámetros	1:25 000	1:50 000	1:100 000	1:250 000
A	EQM	7,5 m	15 m	30 m	75 m
	CE	12,5 m	25 m	50 m	125 m
B	EQM	12,5 m	25 m	50 m	125 m
	CE	20 m	40 m	80 m	200 m
C	EQM	15 m	30 m	60 m	150 m
	CE	25 m	50 m	100 m	250 m

Fuente: Brasil. Decreto No. 89.817, del 20 de junio de 1984. Establece las instrucciones reglamentarias para los estándares técnicos de Cartografía Nacional. Gaceta Oficial de la República Federativa de Brasil, Brasilia, DF, año 122, No. 120, 22 de junio 1984, sección 1, pp. 8884-8886.

El cálculo de la EQM se produjo con la aplicación de la Ecuación 2.

$$EQM_{plan.} = \sqrt{\frac{(\sum \Delta E^2) + (\sum \Delta N^2)}{n - 1}}$$

(2)

donde ΔE es la diferencia entre las coordenadas del componente E , y ΔN es la diferencia entre las coordenadas del componente N , y n es el número de puntos.

El valor del CE90 se obtuvo de la evaluación de las distancias entre las coordenadas de los puntos de referencia y los puntos homólogos en la imagen de Google Earth, con la aplicación de la Ecuación 1. Los valores se colocaron en orden ascendente y se seleccionaron los primeros 18, que representan el 90% de la muestra de los 20 puntos de control.

A partir de los valores de la EQM y del CE90 para cada área de prueba, se clasificó la PEC. A continuación, se realizó el análisis de tendencias y la prueba de Chi-Cuadrado. Para identificar un posible error sistemático se aplicó el análisis de tendencias de la prueba "t" de Student.

Para calcular las discrepancias en ambas direcciones, se utiliza la Ecuación 3 y la Ecuación 4.

$$\overline{\Delta E} = \sum_{i=1}^n \Delta E_i / n = \left(\sum_{i=1}^n (E_i^c - E_i^d) \right) / n \quad (3)$$

$$\overline{\Delta N} = \sum_{i=1}^n \Delta N_i / n = \left(\sum_{i=1}^n (N_i^c - N_i^d) \right) / n \quad (4)$$

Donde: n = número de puntos de control; N_i^c e E_i^c e E_i^d son coordenadas de los puntos de referencia obtenidos; por ejemplo, con medición GNSS o un documento cartográfico más preciso y N_i^d e E_i^d son coordenadas de los puntos correspondientes en el producto a ser $\in N_i^d$ e E_i^d).

Luego, se realizan pruebas de hipótesis:

- Para la coordenada N:
 $H_0: \Delta N = 0$ entonces N es insesgado (no es tendencioso).
 $H_1: \Delta N \neq 0$ entonces N es sesgado (es tendencioso).
- Para la coordenada E:
 $H_0: \Delta E = 0$ entonces E es insesgado.
 $H_1: \Delta E \neq 0$ entonces E es sesgado.

Una muestra se considera sesgada cuando el valor de la prueba "t" de Student calculado no está dentro del rango de los valores "t" establecidos para un nivel de confianza dado.

Inicialmente se realizó el "Test de Tendencia", para un nivel de confianza $(1-\alpha)$, que en este caso es del 90%, por lo que se puede concluir que las coordenadas que tienen variación media cero no tienen sesgo. Los valores "t" para las coordenadas N y E se calculan mediante la Ecuación 5 y Ecuación 6:

$$t_N = (1/S_N) * \overline{\Delta N} * n^{1/2} \quad (5)$$

$$t_E = (1/S_E) * \overline{\Delta E} * n^{1/2} \quad (6)$$

donde S_N y S_E corresponden a las desviaciones estándar de las discrepancias en las direcciones N y E, obtenidas de la Ecuación 7 y la Ecuación 8:

$$S_N = \left(\sum_{i=1}^n (\Delta N_i - \overline{\Delta N})^2 / (n - 1) \right)^{1/2} \tag{7}$$

$$S_E = \left(\sum_{i=1}^n (\Delta E_i - \overline{\Delta E})^2 / (n - 1) \right)^{1/2} \tag{8}$$

Para evaluar la compatibilidad de la escala apropiada en la plataforma Google Earth se calcularon la desviación estándar respectiva y los valores de Chi-Cuadrado en las direcciones N y E con la aplicación de la Ecuación 9 y la Ecuación 10, respectivamente:

$$\chi_N^2 = [(n - 1) * S_N^2 / \sigma^2] \tag{9}$$

$$\chi_E^2 = [(n - 1) * S_E^2 / \sigma^2] \tag{10}$$

donde σ^2 es el Error Estándar Esperado (Valor ECM - Error Cuadrático medio según el Decreto 89.817). Si $\chi_N^2 \leq \chi_{n-1,\alpha}^2$ entonces el producto cartográfico cumple con la exactitud en la dirección N. Si $\chi_E^2 = [(n - 1) * S_E^2 / \sigma^2]$ entonces el producto cartográfico cumple la exactitud en la dirección E.

4. Resultados y discusión

En la Tabla 5 se presenta el análisis estadístico de la calidad de imagen de la plataforma Google Earth para los estados de Alagoas, Río de Janeiro, Goiás, Tocantins y Santa Catarina, así como los valores del EQM, el CE90 y la clasificación EPC (Estándar de Precisión Cartográfica) de Brasil.

Tabla 5. Datos de la calidad posicional de las imágenes Google Earth

Estados	Máximo	Mínimo	PROMDE IO	MDE IANA	EQM	CE	EPC
Alagoas	12,03 m	1,28 m	5,26 m	4,68 m	6,31 m	10,80 m	1:25 000 A
Río de Janeiro	12,50 m	2,10 m	7,42 m	7,03 m	8,00 m	9,54 m	1:25 000 B
Goiás	20,26 m	0,50 m	4,33 m	2,77 m	6,29 m	7,97 m	1:25 000 A
Tocantins	25,40 m	1,64 m	6,14 m	4,04 m	8,42 m	9,95 m	1:25 000 B
Santa Catarina	21,51 m	1,00 m	8,51 m	8,03 m	10,20 m	15,37 m	1/25.000 B

Fuente: elaborado por el autor.

Estas evaluaciones se realizaron en diferentes áreas del territorio brasileño, seleccionadas aleatoriamente; condicionadas a pertenecer a diferentes regiones y con diferentes condiciones topográficas. La Tabla 5 demuestra que a pesar de estas condiciones adversas, los resultados son similares, siendo calificados en una escala de 1:25 000.

La Tabla 5 muestra que las discrepancias encontradas en las imágenes de la plataforma Google Earth son compatibles con el EPC A (Analogico) para la escala de 1: 25 000 en casi la mitad de las muestras y las demás fueron clasificadas con clase B de la misma escala.

Si bien los resultados muestran la misma escala (1: 25 000), variando solo en las clases A y B, los valores estadísticos difieren entre ellas. Estas diferencias se deben a la variación en las características de la topografía predominante que difieren entre las regiones estudiadas, con la misma cantidad de puntos de control e independientemente de la extensión del área. También a la resolución de las imágenes en la propia plataforma Google Earth, que varía a lo largo de la superficie de la Tierra.

Los resultados presentados en la Tabla 5 son similares a los encontrados en los estudios de Vaz *et al.* (2019), cuando concluyeron que las imágenes en la plataforma Google Earth obtuvieron una clasificación compatible con el EPC en clase A para la escala de 1:25 000.

Se observa que los datos presentados en la Tabla 5 se acercan a los resultados obtenidos en el estudio de Soares *et al.* (2010) donde presentaron una compatibilidad para la escala de 1:30 000 del análisis de la prueba de Chi-Cuadrado para el municipio de Pato Branco ubicado en el suroeste del Estado de Paraná.

Las Figuras 5, 6, 7, 8 y 9 ilustran las discrepancias en el eje E y en el eje N de las imágenes para cada estado evaluado.

Es posible ver en estas figuras la presencia de "outliers", los cuales fueron eliminados del procesamiento del análisis. Al eliminar dichos puntos de la valoración antes mencionada el número de puntos estuvo por debajo del recomendado por Merchant (1982), por la NSSDA (1998), entre otros estudios. Sin embargo, los estudios realizados por Zomrawi *et al.* (2013), señalan la posibilidad de un buen resultado a partir de 16 puntos, según el análisis realizado en la capital sudanesa.

La Figura 5 ilustra la distribución de las discrepancias de imágenes en la plataforma Google Earth en el Estado de Alagoas, donde se concentran alrededor del eje E (datos que divergen drásticamente del promedio, se alejan de la normalidad y se mantienen fuera de la curva normal), lo que puede indicar la presencia de un error aleatorio. Estos errores aleatorios pueden identificarse a través de valores "outliers" y, por lo tanto, excluirse para no comprometer la calidad de los datos.

Aunque no se utiliza en el presente estudio, se puede citar una técnica prometedora para eliminar el Kolmogorov-Smirnov (KS) no paramétrico de los valores atípicos, la estimación de la normalidad en la distribución del error se aplica a partir de dos conjuntos de valores, comparando una distribución de

frecuencia acumulada observada. Basado en muestras recolectadas al azar y una distribución de frecuencia acumulativa empírica basada en una distribución normal. La prueba identifica el punto en el que estas dos distribuciones muestran la máxima divergencia, calculada estimando los valores absolutos de divergencia (Corder y Foreman, 2011).

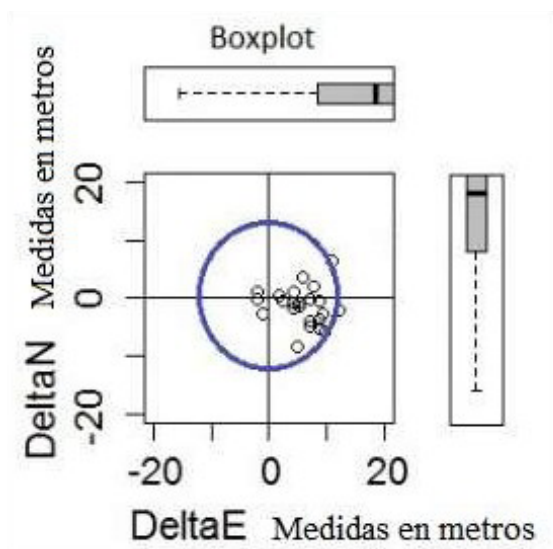


Figura 5. Boxplot del análisis de las imágenes del estado Alagoas.
Fuente: elaborado por el autor.

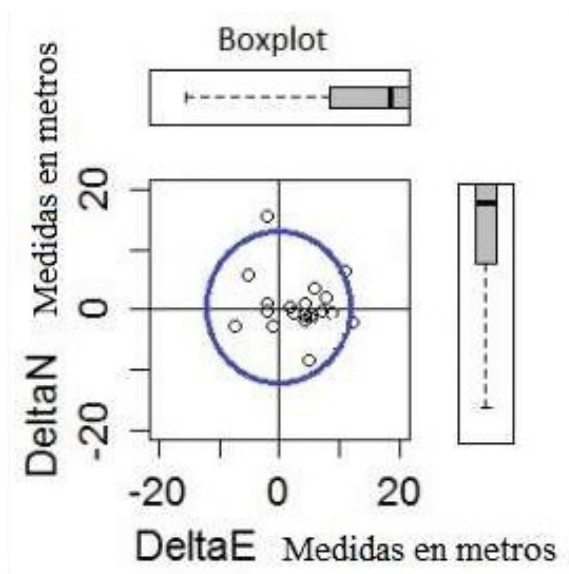


Figura 6. Boxplot del análisis de las imágenes del estado Rio de Janeiro.

Fuente: elaborado por el autor.

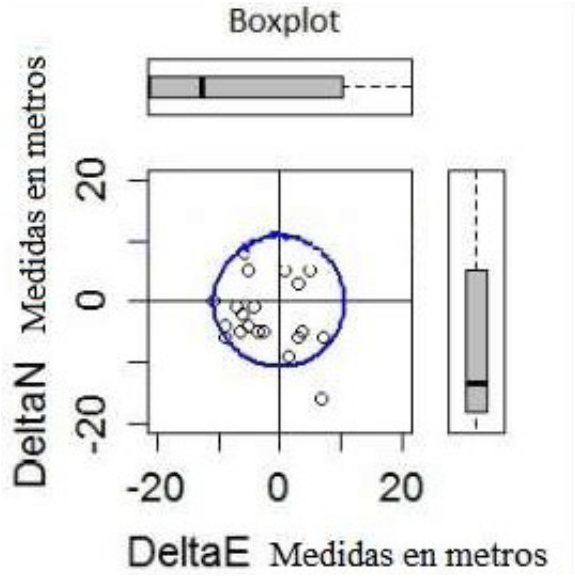


Figura 7. Boxplot del análisis de las imágenes del estado Goiás.
Fuente: elaborado por el autor.

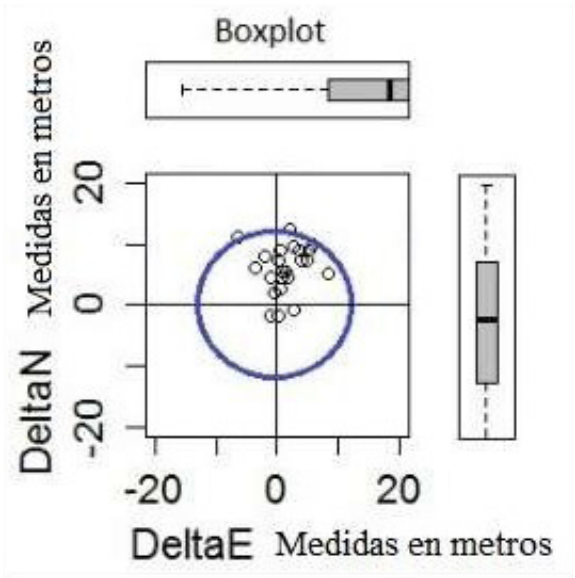


Figura 8. Boxplot del análisis de las imágenes del estado Tocantins.
Fuente: elaborado por el autor.

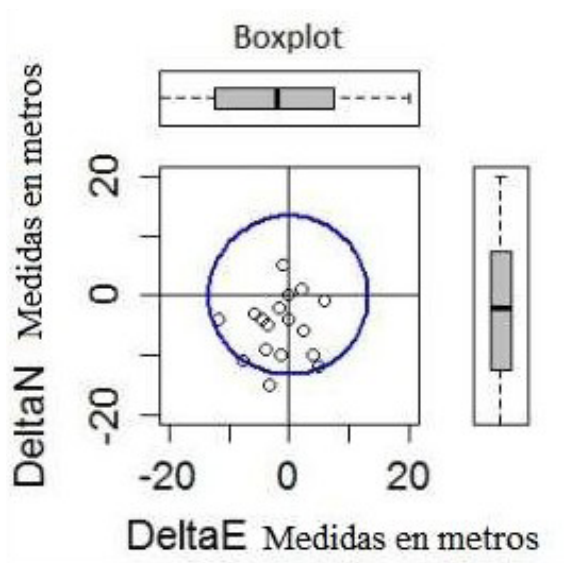


Figura 9. Boxplot del análisis de las imágenes del Santa Catarina.

Fuente: elaborado por el autor.

En la Figura 6 se muestra la distribución de las discrepancias en el estado de Río de Janeiro, donde se encuentran dispersas, con una pequeña concentración en el eje E, con la presencia de 3 “outliers”. Esta configuración se caracteriza por la amplia variación en el tipo de relieve presente en la muestra tal como se presenta en varios estudios recientes como los de Cerqueira (2004), IBGE (2010), Santos (2015).

La Figura 7 muestra las discrepancias en el estado de Goiás, con una pequeña concentración en el eje E, con la presencia de un único “valor atípico”. La causa de estas discrepancias puede estar relacionada con el número de GCP utilizados, ya que no fue posible obtener un número superior al indicado por la NSSDA debido a la no disponibilidad de dichos datos en la base de datos del IBGE. Según Santos (2010), uno de los puntos críticos en el control de calidad posicional en datos espaciales es el número de GCP utilizados en el análisis y su distribución, ya que los modelos de análisis estadístico de dependencia espacial y posterior modelado, requieren una alta cantidad de puntos.

La Figura 8 informa que las discrepancias en el estado de Tocantins se concentran alrededor del eje N, lo que puede indicar la presencia de un error aleatorio en la dirección norte. Se identifica la presencia de 2 “outliers”, probablemente debido a los datos utilizados en la georreferenciación en las imágenes referidas. Como se presenta en otros estudios (Overney *et al.* (2007),

Vitti *et al.* (2018), entre otros) existen errores similares que indican que son aleatorios en las imágenes evaluadas.

La Figura 9 muestra que las discrepancias en el estado de Santa Catarina se concentran en la parte sur, lo que puede indicar la presencia de un error aleatorio en esta dirección. Se observa también a presencia de 1 “outlier”.

Tabla 6. Media aritmética de los residuos encontrados en la imagen de la plataforma Google Earth

<i>Estados</i>	<i>“T” de Student (calculado en metros)</i>		<i>“T” tabulado</i>
Muestras	Eje E	Eje N	Valores en metros
Alagoas	-1,61	1,15	1,328
Río de Janeiro	1,14	1,50	1,328
Goiás	1,88	0,93	1,328
Tocantins	1,49	0,47	1,328
Santa Catarina	0,18	1,91	1,328

Fuente: elaboración propia.

En la Tabla 6 se muestra la prueba “t” de Student y la Tabla 7, la prueba de Chi-Cuadrado, donde la primera señala la presencia o ausencia de una tendencia en una dirección determinada y la segunda muestra la prueba de exactitud en cada una de las muestras.

Los datos presentados en la Tabla 6 indican la presencia de errores aleatorios en todas las áreas evaluadas. Según Lousada y Fernandes (2017), es posible obtener una nueva imagen de mejor calidad posicional a partir de la eliminación de valores sobreestimados (valor positivo) y subestimado (valor negativo) en las dos direcciones que se muestran en la Tabla 6. Sin embargo, el presente estudio solo identificó la tendencia y no se preocupó por eliminarla. La Tabla 7 presenta el análisis de tendencias y la compatibilidad de la escala de imágenes en cada una de las muestras.

Tabla 7. Prueba de tendencias y compatibilidad de escalas

<i>Muestras</i>	<i>Tendencia (Prueba de “t” Student)</i>	<i>Compatibilidad de escalas (prueba de Chi-Cuadrado)</i>
Alagoas	Presenta tendencia en el Eje E	1:25.000 padrón B
Rio de Janeiro	Presenta tendencia en el Eje N	1:25.000 padrón B
Goiás	Presenta tendencia en el Eje E	1:25.000 padrón B
Tocantins	Presenta tendencia en el Eje E	1:25.000 padrón B
Santa Catarina	Presenta tendencia en el Eje N	1:25.000 padrón C

Fuente: elaboración propia.

Los resultados presentados en las Tablas 6 y 7, demostraron que las imágenes en la plataforma Google Earth muestran tendencias donde el desplazamiento máximo en el eje N es de 1,91 m y en el E de 1,88 m. Este resultado también fue observado por Silva y Nazareno (2009), especialmente con una variación significativa principalmente en el E con -6,691 m. En el caso de las N mostró menor valoración que la obtenida en el presente estudio -0,702 m.

Los resultados presentados en la Tabla 7 demuestran que existe un error sistemático en la posición de las imágenes en la plataforma Google Earth en todos los estados, compatible con la escala de 1:25 000 clase B. La excepción es Santa Catarina, que fue clasificada en clase C.

Los resultados presentados en la Tabla 5 presentan divergencias de los resultados presentados en el cuadro 4, ya que los resultados del EPC presentados en la Tabla 5 indican una escala de 1:25 000 en las clases A y B según el estado. Por otro lado, los resultados del Chi-Cuadrado presentados en la tabla 7 muestran una escala 1:25 000 en clases B y C según el estado, indicando posibilidades de resultados diferentes según el método de evaluación utilizado —EPC o Chi-Cuadrado. Esta divergencia en los resultados fue confirmada en los estudios de Carvalho y Silva (2018), donde mostraron que los diferentes métodos de evaluación presentan resultados similares solo cuando los datos evaluados contemplan la situación de distribución normal.

5. Conclusiones

A la vista de los resultados presentados en este estudio, se puede decir que el PEC de las imágenes puestas a disposición en la plataforma Google Earth son compatibles con la escala de 1:25 000 en las clases variables B y C (EPC analógico), sirviendo como insumo para la elaboración de mapas topográficos, utilizando la metodología de cálculo EQM y EC90. Sin embargo, al aplicar el método de prueba Chi-Cuadrado, hay una indicación para la escala 1:25.000 clases A y B (EPC analógico).

Independientemente del método de evaluación, ya sea por EQM y EC90 o por el método Chi-Cuadrado, todos los resultados apuntan a la compatibilidad de la plataforma con una escala de 1:25 000, incluso si las áreas presentan diferentes condiciones topográficas.

Los resultados muestran diferencias en clases, cuando se utilizan diferentes métodos. Por ejemplo, para los estados de Alagoas, Goiás y Santa Catarina, donde la prueba de Chi-Cuadrado presenta resultados con una clase por debajo (de menor calidad).

Los resultados de este estudio también mostraron que existe un error sistemático (tendencia) en la plataforma Google Earth, que no es uniforme en todo el territorio brasileño. Sin embargo, se han implementado actualizaciones y correcciones con el tiempo, mejorando la calidad posicional con cada actualización de la plataforma.

Los diferentes valores de EQM obtenidos en este estudio indican que la calidad de la plataforma Google Earth varía en todo el territorio brasileño, lo que se puede entender porque la plataforma es un mosaico con imágenes de diferentes resoluciones espaciales.

Esta misma metodología se puede adoptar para evaluar la plataforma Google Earth en otros países de América del Sur, con el fin de identificar patrones similares, facilitando la aplicación con un conocimiento más claro de su calidad.

Bibliografía

- Ariza López, F. J. (2002). *Calidad en la producción cartográfica*. Ed. Ra-Ma, Madrid, España, 2002. 424 p.
- Ariza López, F. J., Atkinson, A. D. J., Balboa, J. L. G., Avi, J. R. (2010). Analysis of user and producer risk when applying the ASPRS Standards for Large Scale maps. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 76 (5), 625-632. <https://doi.org/10.14358/PERS.76.5.625>
- Ariza López, F. J. A., Gordo, A. D. (2008). Variability of NSSDA estimations. *Journal of Surveying Engineering*, 134(2), 39-44. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9453\(2008\)134:2\(39\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9453(2008)134:2(39))
- ASPRS (American Society for Photogrammetry and Remote Sensing) (2019). Las Specification, version 1.4-R. 14. http://www.asprs.org/wp-content/uploads/2019/03/LAS_1_4_r14.pdf
- Normas Técnicas da Cartografia Nacional (1984). (Decreto No. 89.817 del 20 de junio de 1984). http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/decreto/1980-1989/D89817.htm
- Bravo, J. V. M.; Sluter, C. R. (2015). O problema da qualidade de dados espaciais na era das informações geográficas voluntárias. *Boletim de Ciências Geodésicas*, 21, 56-73. <https://doi.org/10.1590/S1982-21702015000100005>
- Carvalho, J. A. B., Silva, D.C. (2018). Métodos para avaliação da acurácia posicional altimétrica no Brasil. *Revista Brasileira de Cartografia*, 70 (2), 725-744. <https://doi.org/10.14393/rbcv70n2-45404>
- Cerqueira, J. D. M. de. (2004). *Ortorretificação digital de imagens de satélite de alta resolução espacial* [Dissertação de mestrado no Centro de Tecnologia e Geociência. Universidade Federal de Pernambuco]. <https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/3318>
- Corder, G. W., Foreman, D. I. (2011). *Nonparametric Statistics for Non-statisticians: A Step-by-Step Approach*; John Wiley & Sons; ISBN 9780470454619.
- Cruz, C. B. M., Barros, R. S., Rabaco, L. M. L. (2012). Planialtimetric Accuracy Evaluation of Digital Surface Model (DSM) and Digital Terrain Model (DTM) Obtained from Aerial Survey with LIDAR. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 1, 45-48. <https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XXXIX-B1-45-2012>
- Farah, Ashraf and Algarni, Dafer (2014). Positional Accuracy Assessment of Googleearth in Riyadh. *Artificial Satellites*, 49 (2), pp.101-106. <https://doi.org/10.2478/arsa-2014-0008>
- Ferreira, F. R. (2019). *Propostas para a avaliação da acurácia altimétrica dos dados Lidar*. [Tese de Doutorado em Engenharia de Transportes. Escola Politécnica, Universidade de São Paulo]. <https://doi.org/10.11606/T.3.2019.tde-21112019-084218>

- Höhle, J., Pedersen, C. O. (2010). A New Method for Checking the Planimetric Accuracy of Digital Elevation Models Data Derived by Airborne Laser Scanning. *Proceedings of the 9th International Symposium on Spatial Accuracy Assessment in Natural Resources and Environmental Sciences*, University of Leicester. Leicester, UK.
- Liang, J., Gong, J., Li, W. (2018). Applications and impacts of Google Earth: A decadal review (2010-2016). *ISPRS Journal of photogrammetry and remote sensing*, 146 (91-107), <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2018.08.019>
- Lousada, G., Fernandes, M. C. (2017). Avaliação da precisão vertical de modelos digitais de elevação e análise de tendência em diferentes domínios geomorfológicos. *Revista Brasileira de Cartografia*, 69 (7), 1263-1276. <https://seer.ufu.br/index.php/revistabrasileiracartografia/article/view/43987>
- Merchant, D. C. (1982). Spatial accuracy standards for large scale line maps. *Technical Papers of the American Congress on Surveying and Mapping*, 1, 222-231.
- Mohammed, N. Z., Ghazi, A., Mustafa, H. E., (2013). Positional accuracy testing of Google Earth. *International Journal of Multidisciplinary Sciences and Engineering*, 4 (6), 6-9. <http://www.ijmse.org/Volume4/Issue6/paper2.pdf>
- Mozas, A. T. C., Ureña, M. A., Pérez, J. L. (2013). Accuracy of Contour Lines Using 3D Bands. *International Journal of Geographical Information Science*, 27, 2362-74. <https://doi.org/10.1080/13658816.2013.801484>
- National Map Accuracy Standard (1999). *Map Accuracy Standards*. <https://pubs.usgs.gov/fs/1999/0171/report.pdf>
- Nogueira Jr, J. B (2003). *Controle de Qualidade de Produtos Cartográficos: Uma Proposta Metodológica*. [Dissertação de mestrado. Universidade Estadual Paulista]. Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas, 143 pp. http://www2.fct.unesp.br/pos/cartografia/docs/teses/d_nogueira_jr_jb.pdf
- NSSDA (National Standard for Spatial Data Accuracy) (1998). <https://www.fgdc.gov/standards/projects/FGDC-standards-projects/accuracy/part3/chapter3>
- Oliveira, M. Z., Veronez, M. R., Turani, M., Reinhardt, A. O. (2009). Imagens do Google Earth para fins de planejamento ambiental: uma análise de exatidão para o município de São Leopoldo/RS. *Anais do XIV Congresso Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, Natal, Brasil, 1835-1842.
- Ouverney, M. L. M., Antunes, M. A. H., Barbosa, L. G., Sedano, R. A. (2007). Avaliação da ortorretificação de imagens do sensor Quickbird II usando modelo de orientação via RPCS. *Anais XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, Florianópolis, Brasil. INPE, 611-619.
- Santos, A. P. (2010). *Avaliação da Acurácia Posicional em Dados Espaciais com o uso de Estatística Espacial*. [Dissertação de mestrado em Geotecnia. Viçosa, Brazil], Universidade Federal de Viçosa. <https://locus.ufv.br/handle/123456789/3733>
- Santos, A. de P. dos (2015). *Controle de Qualidade Cartográfica: metodologias para avaliação da acurácia posicional em dados espaciais*. [Tese de Doutorado. Universidade Federal de Viçosa, 83-125]. <https://www.locus.ufv.br/handle/123456789/6463>
- Silva, L. A., Nazareno, N. R. X. (2009). Análise do Padrão de Exatidão Cartográfica da imagem do Google Earth tendo como área de estudo a imagem da cidade de Goiânia. *XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*. Natal, Brasil. INPE, 1723-1730.
- Soares, M. C., Ruaro, T. A., Aguiar, C. R. (2010). Controle de qualidade da base cartográfica da cidade de Pato Branco no software Google Earth. *Synergismus scyentifica UTFPR*, 5, 253-257. <http://revistas.utfpr.edu.br/pb/index.php/SysScy/article/view/980/570>

- Souza Lima, R. N. (2012). Google Earth aplicado a pesquisa do ensino de geomorfologia. *Revista de Ensino de Geografia, Uberlândia*, 3 (5), 17-30.
<http://www.revistaensinogeografia.ig.ufu.br/N.5/Lima.php>
- Vaz Menezes, R. R., Lisboa, M. H.M., Paula dos Santos, A., Dias, J. S. (2019). Avaliação da acurácia planimétrica das imagens Google Earth para produção cartográfica. *Revista Brasileira de Cartografia*, 70(2), 367-391.
<https://doi.org/10.14393/rbcv71n2-46327>
- Vitti, D. M. C., Mauad, F. F., Marques Jr, A., Inocêncio, L. C., Veronez, M. R. (2018). Análise direcional de erros sistemáticos em ortomosaico gerado por meio de ARP. *Revista Brasileira de Cartografia*, 70 (5), 1566-1594.
<https://doi.org/10.14393/rbcv70n5-44563>
- Zanetti, J., Braga, F. L. S., do Santos, A. de P. (2018). Comparativo das normas de controle de qualidade posicional de produtos cartográficos do Brasil, da ASPRS e da OTAN. *Revista Brasileira de Cartografia* 70 (1), 359-390.
<https://doi.org/10.14393/rbcv70n1-45259>