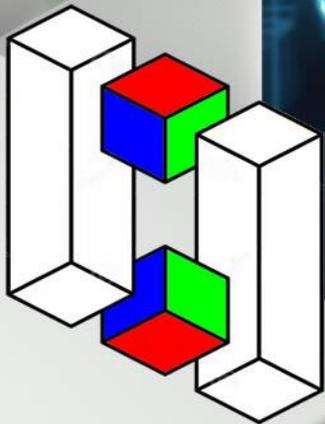


Volumen 1
Agosto 2024

Revista



Science Advanced

Descubre la ciencia sin límites
ISSN : 3028-5216

**Revista
Science Advance
2024 - I**

Comité Editorial

PhD. Angela Rodríguez

PhD. Bellanith Aguilar Vásquez

PhD. Constanza Osorio

PhD. Diana del Pilar Ruiz Pino

PhD. Diana Marcela Urrea Minota

Comité Científico

PhD. Jasleidy Astrid Prada Segura

PhD. Luz Stella Torres Acevedo

PhD. Orlando Celeita Murcia

PhD. Pedro José Jácome Ortiz

PhD. Rafael Atencia

Dirección electrónica: <https://scienceadvanced.org>

Suscripciones: info@scienceadvanced.org - contact@scienceadvanced.org

**Revista
Science Advance
2024 - I**

Editor: Autor Editor Luis Alberto Castaño
Investigación, Innovación Y transformación
Periodicidad: Semestral
ISSN: NO ASIGNADO
Teléfono + 57 316 609 0505

info@scienceadvanced.org - contact@scienceadvanced.org
<https://scienceadvanced.org>

Editor: Luis Alberto Castaño
Apoyo Editorial Stick Rodríguez
Bogotá –Colombia
Agosto 2024

**Revista
Science Advance
2024 - I**

© 2024 Science Advance

© De esta edición:

Distribuidora y Editora

Editorial Autor/editor: Luis Alberto Castaño

Teléfono: +57 316 609 0505

Bogotá, Colombia

<https://scienceadvanced.org>

ISBN: -x-xxxxx-xxx-x

Primera Volumen: Agosto 2024

Diseño Portada: Stick Rodríguez

Diseño de Cubierta: Luis Alberto Castaño

Todos los derechos reservados. Esta publicación no puede ser reproducida, en todo ni en parte, ni registrada en o transmitida por un sistema de recuperación de información, en ninguna forma ni por ningún medio sea mecánico, fotoquímico, electrónico, magnético, electroóptico, por fotocopia, o cualquier otro sin el permiso previo por escrito de los autores.

Es un privilegio presentar la más reciente edición de Science Advanced, ISSN: **POR ASIGNAR**. En este número, continuamos nuestra misión de divulgar investigaciones y reflexiones inéditas que representan lo más vanguardista en ciencias sociales, humanidades e ingenierías. Nuestra revista se destaca por un enfoque interdisciplinario distintivo, que promueve el diálogo entre diversas áreas del conocimiento y la tecnología. Desde su concepción, Science Advanced se ha posicionado como una publicación de referencia tanto a nivel nacional como internacional. Nuestro compromiso con la excelencia académica se refleja en la rigurosidad de nuestro proceso de revisión por pares, conocido como arbitraje doble ciego. Este proceso asegura la calidad y objetividad de cada artículo publicado, garantizando que solo las investigaciones más robustas y originales encuentren un lugar en nuestras páginas.

Science Advanced tiene una presencia destacada en sistemas regionales y universales para revistas científicas en América Latina, Europa, Asia y África. Nuestro alcance global se complementa con acuerdos de suscripción, canje y cooperación científica con bibliotecas, organizaciones científicas, universidades e institutos de renombre internacional. Esta red de colaboración nos permite difundir el conocimiento científico de manera efectiva y asegurar un impacto significativo en la comunidad académica global. Con una periodicidad trimestral y un enfoque principalmente virtual, Science Advanced responde a la necesidad contemporánea de compartir información científica de manera ágil y accesible. Nuestra plataforma digital, www.scienceadvanced.org, permite a investigadores, estudiantes, académicos y profesionales acceder a los contenidos más recientes y relevantes en sus áreas de interés.

Valoramos la diversidad lingüística y aceptamos artículos originales e inéditos redactados principalmente en inglés y español. Esta política no solo amplía nuestra audiencia, sino que también enriquece el diálogo académico internacional, permitiendo la inclusión de perspectivas diversas y multiculturales en nuestras publicaciones. Invitamos a nuestra comunidad académica a enviar sus contribuciones y a participar en este diálogo global de conocimiento. Las fechas establecidas para la recepción de artículos proporcionan un marco de seguridad y confianza para nuestros autores, asegurando un proceso de publicación transparente y eficiente. Para consultas o envíos de artículos, nuestro equipo editorial, presente en Colombia, México, Perú, Reino Unido, Estados Unidos, Filipinas, India y Alemania, está disponible para asistirlos. No duden en contactarnos a través de info@scienceadvanced.org o contact@scienceadvanced.org.

En nombre del comité editorial de Science Advanced, agradezco su continuo apoyo y contribuciones. Esperamos que esta edición inspire nuevas investigaciones y fomente un intercambio académico fructífero.

Atentamente,

Luis Alberto Castaño
Editor

Contenido

- 6- 17 Revisión de Modelos de estudio islas de calor en áreas urbanas
- 18-44 Condiciones e impactos sobre datos cartográficos en Colombia
- 45-54 Acercamiento a identificación de errores en nubes de puntos
- 55-62 Geometría utilizada en nubes de puntos de alta densidad
- 63- 70 Sensores remotos pasivos y su utilidad en Drones

Revisión de Modelos de estudio islas de calor en áreas urbanas Review of Heat Island Study Models in Urban Areas

Received: 02 02 2024, Accepted: 21 06 2024, Available online: 08 07 2024

Yeimy Paola Tique Pinzón. Ingeniera topográfica; Magister en Desarrollo Sustentable y Gestión Ambiental, Facultad de Medio Ambiente y recursos Naturales. Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Bogotá D.C., Colombia. yptiquep@correo.udistrital.edu.co

William Benigno Barragán Zaque. Magister fotogrametría y geoinformática, especialista en sistemas de información geográfica. Profesor asociado, Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Bogotá D.C., Colombia. wbarraganz@udistrital.edu.co
<https://orcid.org/0000-0001-9851-7857>

Nelsy Emelina Mora Chávez. Phd Educación. Magister en enseñanza de las ciencias exactas y naturales. Docente área de ciencias Naturales en Secretaria de educación del distrito. Bogotá. Email: nemorac@unal.edu.co
<https://orcid.org/0000-0001-6482-0567>

Resumen

El presente artículo de revisión está encaminado a identificar y analizar, algunos modelos de estudio empleados para el modelamiento de islas de calor en una escala mundial, empleando herramientas enfocadas en los sensores remotos. Para ello se empleó una metodología de búsqueda sistémica de literatura encontrada en el rango temporal comprendida en los años 2009 al 2019 respectivamente. De igual manera se empleó un índice de frecuencia de citación bibliográfica, con el fin de poder establecer el orden de importancia promedio a partir de cuartiles (Q) para algunos modelos y herramientas detectados en las bases de datos consultadas. Los resultados encontrados permitieron identificar cinco modelos empleados a nivel mundial: modelos de balance de energía (55%), Modelo de dinámica de fluidos computacional (31%), Modelo de Dosel urbano (38%), Modelo de Mesoescala (26%) y modelo de microescala (22%). Así mismo la identificación de herramientas dirigidas a sensores remotos identifico una prevalencia de los estudios por información obtenida del infrarrojo térmico (52%), sobre los sensores remotos convencionales (31%). De esta manera se observa que el modelo con mayor frecuencia de citación es el modelo de balance de energía (Q3). A partir del análisis geográfico de esta revisión, se pudo determinar que, China es el país que reporta mayor número de documentos de investigación sobre el tema (20%), seguido por Estados Unidos y Suiza.

Palabras clave: *Calor terrestre, urbanización, modelo de simulación, sensores remotos*

Abstract

This review article is aimed at identifying and analyzing some study models used for the modeling of heat islands on a world scale, using tools focused on remote sensors. For this, a systemic literature search methodology found in the time range from 2009 to 2019, respectively, was used. In the same way, a bibliographic citation frequency index was used, in order to establish the average order of importance from quartiles (Q) for some models and tools detected in the consulted databases. The results found allowed the identification of five models used worldwide: energy balance models (55%), computational fluid dynamics model (31%), urban canopy model (38%), mesoscale model (26%) and microscale model (22%). Likewise, the identification of tools aimed at remote sensors identified a prevalence of studies based on information obtained from thermal infrared (52%), over conventional remote sensors (31%). In this way, it is observed that the model with the highest frequency of citation is for the energy balance model (Q3). From the geographic analysis of this review. It was determined that China is the country that reports the highest number of research documents on the subject (20%).

Key Words: *Terrestrial heat, urbanization, simulation model, remote sensing.*

1. Introducción

En las últimas décadas el mundo se ha transformado significativamente en todos sus aspectos, desde la parte tecnológica, industrial hasta la social, de igual manera el crecimiento poblacional y la expansión urbana, han tenido un rápido desarrollo, por lo que se hace necesario una revisión exhaustiva del estado del arte referente a Islas de Calor Urbana, en adelante ICU, debido a que los procesos migratorios convirtieron ciudades en mega ciudades (Peng, Hu, Dong, Liu, & Liu, 2020). Donde los cambios de usos de suelo han sido evidentes para dar paso a actividades urbanísticas, que permiten asegurar a la sociedad espacios y recursos (Soto, Barrero, & Cleves, 2020). Dentro de estas actividades se concentran los procesos constructivos que dan paso al desarrollo, como son el sistema vial y de edificaciones, donde las propiedades térmicas de los materiales (Soto, Barrero, & Cleves, 2020) inciden directamente sobre los problemas más significativos de las ciudades, como la contaminación del aire, escases de recursos y cambio climático (Solis, Ranfla, & Montoya, 2012).

De ellos se derivan los efectos de Islas de Calor (ICU), que radica en las diferencias de temperatura existente entre las zonas rurales y las urbanas. Esta diferencia de temperaturas se da por varios factores, especialmente por la remoción de la cubierta vegetal natural, la impermeabilización de las superficies y emisión de contaminantes a la atmosfera (Solis, Ranfla, & Montoya, 2012), exposiciones presentadas en su mayoría por la industria y el parque automotor de las ciudades; la capacidad de ciertos materiales para absorber calor durante el día, y la lenta irradiación de los mismos en la noche (Soto, Barrero, & Cleves, 2020). De igual manera la variación de temperatura en las masas de aire, donde se relaciona la temperatura superficial con alturas o profundidades (Anzola, 2014). Es así como las grandes edificaciones imposibilitan el flujo normal de las corrientes de aire, las cuales ayudan en la regulación de la temperatura terrestre, incrementando la incidencia de las ICU.

De esta manera entre más urbanizada sea una zona y existan menos espacio o zonas verdes que aseguren un equilibrio térmico. Serán áreas más propensas a generación o propagación de las ICU, para lo cual es necesario emplear metodologías de estudio que permitan realizar un completo análisis de estas zonas, donde la densidad urbanística juega un papel importante en la selección de metodologías apropiadas para este fin.

Partiendo de la problemática generada por las ICU y los efectos climatológicos sobre el medio ambiente atmosférico, se convierte en un tema de especial importancia debido a la tendencia del mundo hacia la urbanización y el modelo de dispersión entre ciudades

(Solis, Ranfla, & Montoya, 2012), esta transformación hace que las ciudades puedan generar condiciones medioambientales propias, las cuales pueden alterar de manera significativa el estilo de vida y los hábitos dentro de las ciudades. Realizar una revisión bibliográfica de modelos o prototipos de identificación de ICU en contextos globales, permite la realización de un análisis investigativo sobre algunas metodologías usadas, en el estudio de la problemática planteada y la identificación de herramientas empleadas para realizar este tipo de estudios. Además de poder analizar los diferentes modelos de simulación, métodos de observación y características (Ye Caihua, 2011) evidenciados a nivel global y que puedan ser trabajados en el contexto local. Ha esto se añade la relevancia de este tipo de estudios, para realizar un seguimiento de la calidad ambiental como herramienta para resolver problemas del clima urbano (Caio F. e Silva, 2016).

2. Elementos conceptuales relevantes

La formación de las ICU está determinada por diferentes factores, dentro de los cuales se puede relacionar la pérdida de la capa vegetal que ha sido sustituida por superficies impermeables, como el concreto, asfalto, ladrillo y otros materiales de construcción, los cuales absorben el calor, lo acumulan y luego lo irradian en la noche. Provocando alteraciones en el balance hídrico y radiactivo superficial, lo que induce, en consecuencia, a un aumento de la temperatura en las áreas urbanas (Chen, 2006), (Córdova, 2011), este efecto es directamente proporcional al tamaño de las ciudades. Otro efecto que incide en la formación de las ICU se debe a que en el último siglo se registró un alto incremento en la quema de carbón, aceite, petróleo y sus derivados, lo que ha elevado de manera significativa los índices de dióxido de carbono y otros gases causantes de los gases de efecto invernadero (Anzola, 2014).

La variabilidad climática que se viene presentando a nivel mundial, en especial el aumento de temperaturas que se ha venido registrando en zonas urbanas (Shweta Jaina, 2020), se ha considerado un evento al que se le debe prestar especial atención, debido al alto impacto que este fenómeno tiene sobre la sociedad, los ecosistemas y la biodiversidad presente en zonas urbanas.

Metodologías relevantes utilizadas en la temática de investigación

Dentro de los métodos de simulación existentes para modelar islas de calor, se contemplan modelos que examinan la longitud urbana y la velocidad del viento a través de los modelos de balance de energía (T.-W. Sotavento, 2012), a la vez se han realizado simulaciones numéricas donde se emplean modelos de capa límite,

Mesoescala, Microescala y modelos de dosel urbano multicapa para investigar el fenómeno de formación de ICU (Kusaka & Kimura, 2004). Adicionalmente el advenimiento de la teledetección a mediados del siglo XX sirvió como herramienta principal para el estudio de las ICU (Espinoza & Vide, 2014), además del acelerado desarrollo de los sensores remotos y las herramientas de sistemas de información geográfica, que dentro de otros permiten estimar temperaturas, indirectamente la presión atmosférica, así como velocidades del viento y las razones de movimiento de masa de aire, de manera cuantitativa (Cueto, 2007). Además de clasificar objetos por clase, sustancia y distribución espacial, aplicando una clasificación zonal supervisada de componentes urbanos para determinar los posibles factores, que puedan influenciar el fenómeno de las ICU (Anzola, 2014). Para ellos los satélites de última tecnología están dotados por sensores infrarrojos térmicos (TIRS), que permite analizar datos de la temperatura de la superficie terrestre (Yue, 2016).

Estado del conocimiento

(Nieuwolt, 1966) fue de los primeros autores que estudios la variación de la temperatura a causa de la urbanización, (OKE, 1973), realizó la comparación relacional del tamaño de la ciudad con la magnitud de la ICU, por otro lado (Rao, 1972) propuso el primer método para estudio de las ICU, empleando datos de banda del infrarrojo térmico, lo que postuló a los procesos de teledetección como herramienta relevante para estudios ambientales y urbanos.

El Objetivo de esta revisión bibliográfica es identificar algunos de los modelos empleados para estudiar las islas de calor a nivel mundial, en un rango temporal de 10 años (2009-2019). De esta forma, analizar algunos modelos empleados en la realización de este tipo de estudios. Así mismo, ilustrar en que países han estudiado está problemáticas y determinar cuál es la herramienta más utilizada enfatizando siempre, en el uso de los sensores remotos.

3. Métodos

Una vez planteado el objetivo de este artículo de revisión y con el fin de cumplir lo propuesto, se empleó una metodología sistemática de búsqueda sobre los modelos de estudio de islas de calor. Teniendo como referente temporal el periodo comprendido entre 2009 al 2019 y una escala geográfica de investigación a nivel mundial. Las bases de datos multidisciplinarias consultadas fueron: (1) Scopus, (2) Science Direct y (3) Google Scholar. esta selección se estableció a partir de la potencia de búsqueda y herramientas para filtrar información propia de estas bases de datos. Adicionalmente permiten organizar y

clasificar la información de acuerdo a la necesidad de la temática de la revisión.

En el sistema de búsqueda se emplearon de manera global palabras consultadas y combinadas en idioma inglés dado a que se obtenían mayores resultados en la investigación.

El sistema de análisis bibliográfico considero 4 etapas, las cuales fueron analizadas y clasificadas a partir de índices de frecuencia de citación. La clasificación por cuartiles se determinó a partir del índice de citación promedio, este índice se encuentra entre 0.0-1.0. Clasificado en los siguientes rangos: Q1 = 0,75-1,00; Q2 = 0.50-0.75; Q3 = 0.25 – 0.50 y Q4 = 0.00 – 0.25 (Zafra, Temprano, & Tejero, 2017). De esta manera, en esta revisión se asumió que la importancia de los modelos detectados probablemente dependió de la frecuencia de citación en las bases de datos consultadas. Lo que quiere decir que, el cuartil Q1 posiblemente asoció los modelos de mayor importancia, mientras que el cuartil Q4 asocia los temas de menor importancia o menos estudiados a nivel mundial. Por ejemplo, durante la segunda etapa de revisión se detectaron en la base de datos de Scopus 1190 documentos que reportaron los modelos de balance de energía en comparación de los 1874 documentos detectados durante la etapa 1. Es decir que el índice de citación para los modelos de balance de energía fue $1190/1874=0.64$ (Q2). El cual se clasifica en el segundo cuartil de citación (Tabla 1).

Etapa de análisis

Etapa 1: en la primera etapa de búsqueda bibliográfica se emplearon las siguientes combinaciones de palabras clave en inglés: urban heat islands (Islas de calor urbana) y simulation models (modelos de simulación). En esta etapa se detectó en total 19365 documentos entre las bases consultadas.

La base de datos que arrojó mayores resultados fue Google Scholar (13100; 68%), seguida por Science Direct (4391; 22%) y Scopus (1874; 10%).

Etapa 2: Una vez establecidas las palabras clave en la etapa 1, se emplearon las herramientas de filtro de la base de datos Scopus, para detectar las palabras clave adicionales y que tuvieran relación con esta revisión.

Tabla 1. orden de importancia modelos islas de calor

Etapa	Palabras clave	Bases de datos						índice de citación promedio	Cuartil medio
		Scopus		Science Direct		Google Scholar			
		Documentos encontrados	índice de Citación (Q)	Documentos encontrados	índice de Citación (Q)	Documentos encontrados	índice de Citación (Q)		
1	Islas de calor Urbana y métodos de simulación	1874	1	4391	1	13100	1	-	-
2	Modelo de Balance de energía	1190	0,64	2394	0,55	6300	0,48	0,55	Q2
	Modelo de Dinámica de Fluidos computacional	1000	0,53	768	0,17	2780	0,21	0,31	Q3
	Modelo de Dosel Urbano	944	0,50	1159	0,26	4950	0,38	0,38	Q3
	Modelo Mesoescala	911	0,49	460	0,10	2360	0,18	0,26	Q3
	Modelo Microescala	911	0,49	261	0,06	1670	0,13	0,22	Q4
3	infrarrojo termal	1056	0,56	595	0,14	11200	0,85	0,52	Q2
	sensores remotos	364	0,19	1080	0,25	6590	0,50	0,31	Q3

Fuente: Elaboración propia

De esta manera las palabras claves fueron (Tabla 1): *Energy Balance Model* (Modelo de balance de energía), *Urban Canopy Model* (Modelo de Dosel urbano), *Computational Fluid Dynamics Model* (Modelo de Dinámica de Fluidos computacional), *Mesoscale Model* (Modelo de meso escala) y *Microscale Model* (Modelo de Micro escala).

Etapa 3: La tercera etapa de revisión se desarrolló de manera tal, que permitiera organizar las subcategorías de análisis en relación con los modelos de estudio de ICU detectados. Nuevamente se empleó el índice de frecuencia de citación (Q) en este análisis. Las palabras claves empleadas durante esta etapa fueron: *Remote Sensing* (Sensores remotos) y *Thermal Infrared* (infrarrojo termal). En esta sección se tuvieron en cuenta los siguientes criterios de inclusión

de información: métodos de simulación para estudios de islas de calor en áreas urbanas y herramientas de sensores remotos y datos del infrarrojo termal, tipo de documentos incluidos (Artículos de investigación, libros y capítulos de libros). Así mismo, los criterios de exclusión de información referentes a documentos que estuvieran por fuera del rango temporal establecido. De esta manera, se seleccionaron un total de 34 documentos que cumplían con todos los criterios, lo que equivale al 0.54% de los documentos detectados inicialmente en la base de datos de Scopus y Science Direct.

Etapa 4: Finalmente, en una última fase se realizó el análisis a partir de la bibliografía seleccionada de la tendencia geográfica en este tipo de estudio.

Para el análisis de los resultados obtenidos, se utilizaron inicialmente con estadísticos descriptivos, como forma de evaluar la normalidad de los datos (Tabla 1). Subseguidamente se realizó un análisis de tablas de contingencia para la clasificación de modelos, localización geográfica y herramientas (tabla 4). Por último, se realizó la prueba de Spearman, donde se analizó la correlación entre métodos, localización geográfica y herramientas con un nivel de confianza del 95%. Para estos análisis se empleó el software estadístico SPSS V22.

4. Resultados

Metodologías de simulación a nivel mundial

La investigación bibliográfica mostro el siguiente orden de importancia para los modelos de simulación de islas de calor identificados a nivel mundial (Tabla 1): (i) Modelo de balance de energía 55%, (ii) modelo de dinámica de fluidos computacional (31%), (iii) Modelo de dosel urbano (38%), (iv) modelos de meso escala (26%) y por ultimo (v) modelos de micro escala (22%). De esta manera y teniendo en cuenta la

tendencia del índice de citación, se evidencio una propensión mundial, al uso de modelos de balance de energía para simulación de islas de calor urbana. De igual manera, los resultados mostraron el siguiente orden de importancia en uso de herramientas de teledetección para este tipo de estudios donde se contempló: (i) infrarrojo termal (52%) y (ii) sensores remotos (31%).

Continuando con la exploración de los resultados iniciales, seguidamente se realizó una búsqueda más cerrada, en relación a los modelos y el uso de herramientas enfocada a sensores remotos. De ello se observó la preferencia por desarrollar modelos de balance de energía con (33%; Q3) y Modelo de Dinámica de Fluidos computacional (29%; Q3) con este tipo de herramientas (tabla 2). En estos estudios se destaca la importancia de la temperatura superficial como parámetro principal en la distribución de energía térmica. Por tanto, los sensores de teledetección infrarrojo térmico son esenciales para la extracción de información (Zhang L. W., 2014), recopilar, analizar y modelar parámetros ambientales como el calentamiento global y las ICU (M. Wang et al ., 2012).

Tabla 2. Orden de importancia modelos y herramientas

Categoría	Herramientas	Documentos detectados (n=)	Q	%	Cuartil
Modelo de dosel urbano	Sensores remotos Infrarrojo térmico	6	0,14	14,3	Q4
Modelo de balance de energía		14	0,33	33,3	Q3
Modelo de Dinámica de Fluidos computacional		12	0,29	28,6	Q3
Modelo Mesoescala		5	0,12	11,9	Q4
Modelo Microescala		5	0,12	11,9	Q4

Elaboración propia

Modelos de mayor importancia investigativa

Por otro lado, se realizó la revisión de los documentos seleccionados, para identificar la producción investigativa a nivel global, donde se evidenció, que en ciertos casos los modelos son combinados para obtener estudios más detallados de las ICU. Uno de estos casos se dio al combinar modelos de Dosel urbano con modelos de meso escala (Varentsov M.I., 2019), donde el primero fue empleado para identificar las anomalías de temperatura del aire cerca de la superficie y el segundo una simulación acoplada. A la vez el modelo de Dosel es ejecutado para simulaciones de sensibilidad (Van Q. Doan, 2019) y lograr representaciones simplificadas (Afshin Afshari, 2018).

En esta investigación, se pudo visualizar los modelos más destacados. Donde, los referentes al balance de energía, muestran mayor producción investigativa en proporción de (41.2%), frente a los demás modelos (Tabla 3). Dado a que el efecto de las ICU es cada vez más evidente y ha afectado gravemente la salud humana en la forma de cambios de temperatura, presión barométrica, humedad, viento así como el aire (M. Wang et al., 2012), (Wenze Yue, 2012) (Liu, 2014), (Blaschke, 2012) (Bian, 2018). A la vez la estrecha relación de este fenómeno con la cobertura del suelo (Weimin Wang, 2019) tiene influencias significativas en la distribución de temperaturas en el campo de las ICU (Deepak Kumar, 2015), (María A. Zoran, 2016). Donde los autores consideran la importancia de estimar los flujos de calor antropogénico, que tiene impactos considerables en el presupuesto energético urbano (Theodoros Nitis, 2017), (Zhang, 2018), (Chengbin Deng, 2013).

Tabla 3. Análisis de artículos identificados por modelos

Investigación (n=34)	localización geográfica	Modelo					Herramienta	
		MDU	MBE	MDFC	Mmeso	Mmicro	SS	IT
(M. Wang et al., 2012)	1	-	x	-	-	-	x	-
(Nitis T et al., 2010)	2	-	-	-	x	-	x	-
(Xie M & Fu M., 2011)	1	-	x	-	-	-	-	x
(Wang W et al., 2018)	1	-	x	-	-	-	-	x
(Zhang LJ et al., 2014)	1	-	x	-	-	-	-	x
(Nitis T et al, 2017)	3	-	-	x	x	-	x	-
(B. Feizizadeh & T. Blaschke., 2012)	4	-	x	-	-	-	-	x
(Kumar D & Shekhar S., 2015)	5	-	x	-	-	-	-	x
(Zhang Y et al., 2018)	1	-	-	x	-	-	-	x
(Doan VQ et al, 2019)	6	x	-	-	-	-	x	-
(Chen YC et al., 2016)	1	-	-	-	-	x	-	x
(Zoran MA et al., 2016)	7	-	x	-	-	-	x	-
(Chun B & Guldmann JM. 2014)	8	-	-	x	-	-	-	x
(Saiping Xu et al., 2016)	1	-	x	x	-	-	x	-
(Weng Q et al., 2011)	8	-	-	-	x	x	-	x
(Zhou B et al., 2013)	9	-	-	x	-	-	-	x

(Zhang Y et al., 2017)	8	-	-	x	-	-	x	-
(Sun TG, 2016., 2016)	1	-	-	x	-	-	x	-
(Huang F et al., 2016)	1	-	-	x	-	-	-	x
(Hu J et al., 2019)	1	-	-	x	-	-	x	-
(Varentsov MI, et al., 2019)	10	x	-	-	x	-	-	x
(Yue W., 2012)	1	-	-	x	-	-	-	x
(Li M et al., 2014)	1	-	x	-	x	-	x	-
(Sismanidis P et al, 2019)	9	-	x	-	-	-	-	x
(Bian Z et al, 2018)	1	-	x	-	-	-	-	x
(Parlow E et al, 2014)	11	x	-	-	-	-	-	x
Afshin Afshari et al., 2019	12	x	-	x	-	-	-	x
Yosha Pasha & Afshin Afshari	12	x	-	-	-	-	-	x
(Wieke Heldens et al., 2017)	4	-	-	-	-	x	x	-
(Zeng F & Gao N., 2017)	3	x	x	-	-	-	x	-
(Simon H et al., 2018)	4	-	-	-	-	x	x	-
Girard P et al., 2018)	11	-	-	x	-	x	x	-
(Lily A et al., 2011)	8	-	x	-	-	-	x	-
(Mallick J et al., 2013)	5	-	x	-	-	-	-	x
Proporción (%)		17,6	41,2	35,3	14,7	14,7	44,1	55,9

Elaboración propia

Notas: 1: China; 2: Croacia; 3: Francia; 4: Alemania; 5: India; 6: Asia; 7: EEUU; 8: Europa; 9: Rusia; 10: Bélgica; 11: Suiza; 12: Abu Dabhi; MDU: modelo Dosel Urbano; MBE: Modelo Balance energía;

MDFC: Modelo Dinámica de fluido computacional; Mmeso: modelo meso escala; Mmicro: Modelo micro escala; SS: sensores remotos; IT: infrarrojo térmico.

Herramientas de Mayor uso en modelos de ICU

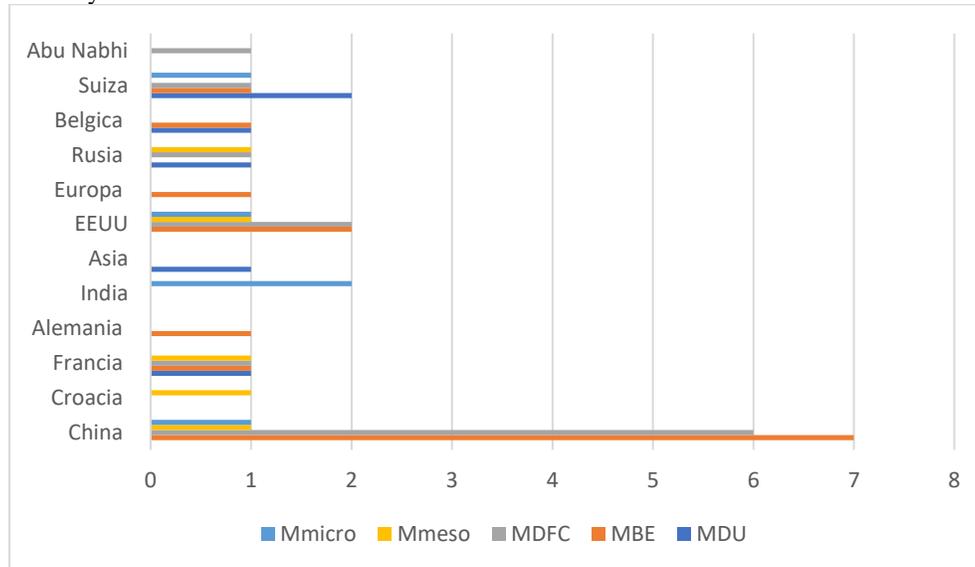
Los efectos de las ICU esta descrito a nivel global como procedente de actividades de urbanización, donde los diferentes factores que conforman las ciudades contribuyen al ambiente térmico (Pan, 2015). En el criterio de inclusión de esta revisión se resaltó las herramientas de teledetección, puesto que en varios estudios destacan la contribución de esta para la estimación de temperaturas terrestres (A. Michel, 2019), (Weng, 2009). Así mismo la teledetección de

las ICU emplea el uso y cobertura del suelo, el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI), el índice de acumulación de diferencia normalizada (NDBI) y el área de superficie impermeable a la vegetación (ISA) -Suelo (VIS), para examinar la relación entre patrones térmicos de la superficie con los tipos de coberturas (Liu Pei, 2009), (Ya Ma, 2010). La resolución espacial también es contemplada en los documentos de revisión y varía depende la zona o el

tipo de modelo, en el estudio de (Santos, Davies, & Milner, 2017) emplearon resolución de 1km, pues consideraron que esta es apropiada para los estudios de riesgo, relacionados con el calor, adicionalmente los datos térmicos fueron superpuestos en una cuadrícula de igual tamaño. Dentro de los resultados obtenidos, se hayo una mayor variabilidad de la temperatura de aire, dentro de algunas celdas de la cuadrícula modeladas, específicamente dentro del centro de la ciudad. mientras que las temperaturas de la superficie presentaron una mayor variabilidad en las fronteras.

Países con mayor investigación ICU

Siguiendo con el análisis de los resultados de la investigación y a partir de la anterior tabla, se clasificaron los documentos de tal manera que se pudiera realizar un estudio de tablas cruzadas con el fin de efectuar el análisis de producción investigativa a nivel mundial frente a los modelos, y herramientas empleadas (Figura 1).



Figurra 1. Distribución geográfica de los modelos investigados
Elaboración propia

La categorización para definir la distribución geográfica de los artículos investigados se realizó teniendo en cuenta los 12 países que reportaban investigación en la selección realizada. Con este análisis fue posible determinar cuál es el país que tiene mayor producción investigativa en esta área. De lo anterior se puede evidenciar que los países que aportan en gran medida a la investigación y modelos de ICU en orden de aporte, destacando los tres primeros, se encuentra China con un número mayor de documentos, de los cuales los modelos más Por otro lado, en la interpretación de las herramientas, frente a los modelos se evidencia una relativa correspondencia entre las dos evaluadas, teniendo una participación de sensores remotos (20; 47.6%) e infrarrojo termal (22; 52.3%). Esto se puede dar por que en teledetección se pueden emplear estas herramientas en conjunto para llegar a evaluaciones un poco más precisas. En el campo de identificación de ICU, basadas en teledetección, son empleados los índices de vegetación para estimar la relación existente entre la temperatura de la superficie terrestre (LTS) – vegetación (Kumar & Shekhar, 2015); en cuanto a los

representativos son: balance energético (20%, 7 documentos), Modelo de Dinámica de Fluidos computacional (17%, 6 documentos) e investigación total por todos los modelos de (44%, 15 documentos). Seguido de Estados Unidos (17%, 6 documentos), y Suiza (14%, 5 documentos) respectivamente. Estos países además de ser considerados extensos, están altamente urbanizados. Y con estos estudios muchos de ellos trabajan en pro de una gestión de planificación regulatoria (Chaohui Yin, 2018).

datos que se puede derivar del infrarrojo térmico , permite identificar la información sobre los niveles de intensidad de ICU (Zhang Y. J., 2018). A partir de los modelos resultantes, pueden ser empleados para mapear una ciudad completa, identificando a la vez los puntos calientes existentes y contribuir así, a la comprensión de las condiciones biometeorológicas humanas de forma rápida y precisa (Chen, Chen, Matzarakis, Liu, & Lin, 2016).

Finalmente, se realizó el análisis de correlación empleando el método de Spearman, con una confianza del 95% (Figura 2). En este análisis se evidenció que

existe una correlación significativa entre China y Estados Unidos, de igual manera se observa una relación inversamente proporcional entre Asia y Suiza, con una correspondencia de 98.7%. las relaciones entre países que reportaron un porcentaje de correspondencia cercano al porcentaje de confianza se dio para: Croacia- Rusia, Francia - Bélgica, Asia - Rusia y Rusia - Abu Nabhi. En estas relaciones se aprecia la igualdad entre investigaciones y temáticas. Queriendo decir con esto, que esa correspondencia se debe a investigaciones realizadas con modelos similares e igualdad en documentos publicados.

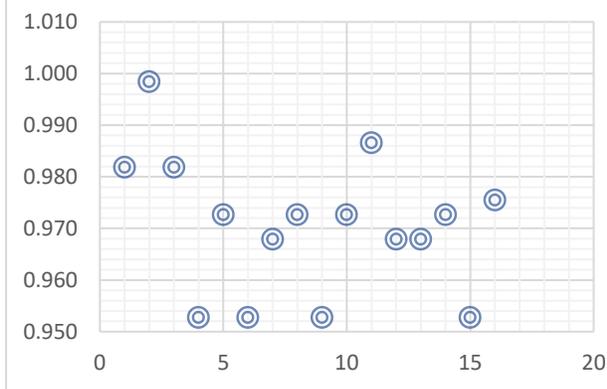


Figure 2. Correlación de Spearman entre países

En cuanto a la correlación observada entre países y herramientas (figura 3) empleadas en el modelado de ICU, se observa que la mayor significancia se da entre China y los sensores remotos con 99.8% de correlación, sin dejar de lado las investigaciones en las que han empleado los datos del infrarrojo térmico, que para este caso proyecta una correlación de 97.9%; Alemania, Estados Unidos y Europa por su lado han realizado sus estudios empleando los datos del infrarrojo térmico. En general, la relación dada entre países y herramientas de teledetección, con niveles de confianza que superan los 96.5%.

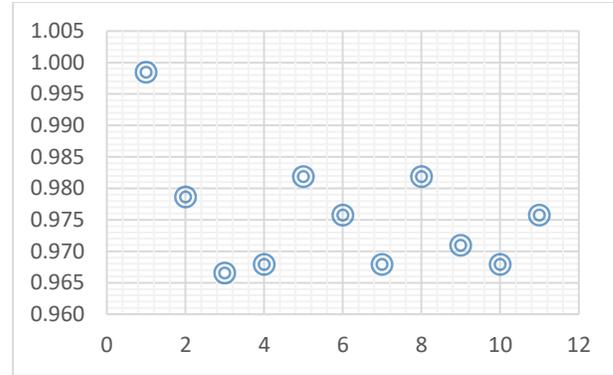


Figure 3. Correlación de Spearman entre Países y Herramientas

Conclusiones

Los resultados sugieren el siguiente orden a nivel mundial para los modelos seleccionados >MBE, >MDU >MDFC > Mmeso >Mmicro; donde en efecto los MBE fueron los únicos que tuvieron una clasificación por cuartil de Q2 y que dentro de las herramientas enfatizadas en la revisión como los sensores remotos y los infrarrojos termales, la mayoría de estudios prefieren modelar con la información obtenida de estos últimos, el cual nos arrojó al inicio de la revisión un índice de citación promedio de 52% ubicándose en la clasificación por cuartiles en Q2.

De acuerdo al análisis realizado sobre las herramientas de teledetección y dado al enfoque térmico que tienen la de la investigación de ICU, es más asequible tomar la información de los infrarrojos termales, ya que proporcionado la información de la temperatura de la superficie terrestre.

En la revisión se pudo observar que algunos investigadores emplean más de dos modelos en la elaboración de las investigaciones, dado a que pueden combinar esos modelos para obtener información de diferentes variables que permiten estimar en mayor proporción de medida la incidencia de las ICU y sus efectos sobre las ciudades. Además de emplear estos estudios en la planificación de los territorios.

Por último, se evidencia que China siendo un País con alta densidad poblacional, está comprometido con la incidencia y formación de ICU, razón por la cual es el país que reporta más investigaciones referentes al tema y no solo de modelarlas. El compromiso también va dirigido en pro de la mitigación de los efectos de la misma.

Bibliografía

- A. Michel, L. R. (2019). Land Surface Temperature Retrieval over Urban areas from simulated TRISHNA data. *Joint Urban Remote Sensing Event* (.
- Afshin Afshari, N. R. (2018). Increasing the accuracy of radiation heat transfer estimation in a lumped parameter Urban Canopy Models . *ElSeiver*, 22-25.
- Anzola, J. P. (2014). Detección e identificación de islas de calor urbano: Un acercamiento desde el estado del arte. *Revista Vinculos*, 127-139.
- Bian, Z. C. (2018). Modelado de las distribuciones de las temperaturas de brillo de un área de estudio de tierras de cultivo utilizando un modelo que combina métodos de radiosidad rápida y presupuesto de energía. *Sens remotas*.
- Blaschke, B. F. (2012). Percepción remota térmica para el monitoreo de la temperatura de la superficie terrestre: Condado de Maraqeh, Irán. *Simposio internacional de geociencia y percepción remota de la IEEE*, 2217-2220.
- Caio F. e Silva, D. A. (2016). Computer Simulation of Three Mesoclimatic Urban the Federal District of Brazil. *ScienceDirect*, 280-288.
- Chaohui Yin, H. Y. (2018). Effects of urban form on the urban heat island effect based on spatial regression model. *ScienceDirect*, 696-704.
- Chen, X. L. (2006). Remote sensing image-based analysis of the relationship between urban heat island and land use/cover changes. *Remote Sensing of Environment*, 133-146.
- Chen, Y. C., Chen, C.-Y., Matzarakis, A., Liu, J.-K., & Lin, T.-P. (2016). Modeling of mean radiant temperature based on comparison of airborne remote sensing data with surface measured data. *Elsevier*, 151-159.
- Chengbin Deng, C. W. (2013). Examining the impacts of urban biophysical compositions on surface urban heat island: A spectral unmixing and thermal mixing approach. *ScienceDirect*, 262-274.
- Córdova, K. (2011). Spatial Geotechnology applied to urban climate studies: Thermal analysis of urban surface and urban land use in the city of Caracas, . *Urban Climate News*, 15-21.
- Cueto, R. G. (2007). Los sensores remotos y su aplicación en la meteorología: un estudio de caso. *Instituto de Ingeniería, UABC*.
- Deepak Kumar, S. S. (2015). Statistical analysis of land surface temperature–vegetation indexes relationship through thermal remote sensing. *ScienceDirect*, 39-44.
- Espinoza, P. S., & Vide, J. M. (2014). El estudio de la Isla de Calor Urbana de Superficie del Área Metropolitana de Santiago de Chile con imágenes Terra-MODIS y Análisis de Componentes Principales. *Revista de Geografía Norte Grande* , 123-141.
- Horbert, M. (2000). Klimatologische Aspekte der Stadt- und Landschaftsplanung. *Landschaftsentwicklung und Umweltforschung* , 1-330.
- Kumar, D., & Shekhar, S. (2015). Statistical analysis of land surface temperature–vegetation indexes relationship through thermal remote sensing. *ElSevier*, 39-44.
- Kusaka, H., & Kimura, F. (2004). Thermal Effects of Urban Canyon Structure on the Nocturnal Heat Island: Numerical Experiment Using a Mesoscale Model Coupled with an Urban Canopy Model . *American Meteorological society*, 1899-1910.
- Liu Pei, D. P. (2009). Evaluación del entorno de calor urbano utilizando imágenes de múltiples algoritmos y múltiples escalas. *Evaluación del entorno de calor urbano utilizando imágenes de múltiples algoritmos y múltiples escalas*.
- Liu, M. L. (2014). Improving mesoscale modeling using satellite-derived land surface parameters in the Pearl River Delta region, China. *JGR Atmospheres*.

- M. Wang et al . (2012). Investigación sobre el efecto de isla de calor urbano durante el proceso de urbanización de Beijing por teledetección y su impacto en la salud ambiental. *Simposio Internacional de Geociencia y Teledetección de IEEE* , 507-510.
- María A. Zoran, R. S. (2016). Impacts of urban growth and heat waves events on the urban heat island in Bucharest city. *Spie.Digital Library*.
- Nieuwolt, S. (1966). The urban microclimate of Singapore. *Journal of Tropical geography*, 30-37.
- OKE, T. R. (1973). City size and the urban heat island. *Atmospheric Environment Pergamon Press*, 769-779.
- Pan, J. (2015). Analysis of human factors on urban heat island and simulation of urban thermal environment in Lanzhou city, China. *Spie.Digital Library*.
- Peng, J., Hu, Y., Dong, J., Liu, Q., & Liu, Y. (2020). Quantifying spatial morphology and connectivity of urban heat islands in a megacity: A radius approach. *Science of the Total Environment*, 1-33.
- Rao, P. K. (1972). Remote sensing of urban "heat islands" from an environmental satellite. *Bulletin of the American meteorological society*, 647-648.
- Santana, L. M., Escobar, L. A., & Capote, P. A. (2011). Influencia de los cambios de ocupación del suelo de Cali (Colombia), entre 1984 y 2003, en la temperatura de superficie. *Ingeniería y Competitividad*, 41-59.
- Santos, R. S., Davies, M. M., & Milner, J. (2017). The variation of air and surface temperatures in London within a 1km grid using vehicle-transect and ASTER data. *IEEEExplore*.
- Shahnilla Haider Rizvi, . K. (2019). Spatio -temporal variations in urban heat island and its interaction with heat wave. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 50-57.
- Shweta Jaina, S. S. (2020). Urban heat island intensity and its mitigation strategies in the fastgrowing. *Journal of Urban Management*, 54-66.
- Solis, J. V., Ranfla, A., & Montoya, A. L. (2012). *Isla de Calor Urbana: Modelación Dinámica y Evaluación de medidas de Mitigación en Ciudades de Clima árido Extremo*. Mexicali (Baja California, México): Información Tecnológica.
- Soto, J. E., Barrero, J. G., & Cleves, G. J. (2020). Análisis de islas de calor urbano usando imágenes Landsat: caso de estudio Armenia-Colombia 1996-2018. *Espacios*, 9-25.
- T.-W. Sotavento, J. L.-H. (2012). Scaling of the urban heat island intensity using time-dependent energy balance. *Science Direct* , 16-24.
- Theodoros Nitis, G. T. (2017). Satellite data based approach for the estimation of anthropogenic heat flux over urban areas. *Spie.digital library*.
- Van Q. Doan, H. K. (2019). Roles of past, present, and future land use and anthropogenic heat release changes on urban heat island effects in Hanoi, Vietnam: Numerical experiments with a regional climate model. *ElSeiver*, 1-9.
- Varentsov M.I., G. M. (2019). Simultaneous assessment of the summer urban heat island in Moscow megacity based on in situ observations, thermal satellite images and mesoscale modeling. *geography Environmrntal Sustainability*, 74-95.
- Varentsov MI, G. M. (2019). Simultaneous assessment of the summer urban heat island in Moscow megacity based on in situ observations, thermal satellite images and mesoscale modeling. *GEOGRAPHY, ENVIRONMENT, SUSTAINABILITY*, 74-95.

- Weimin Wang, K. L. (2019). Remote sensing image-based analysis of the urban heat island effect in Shenzhen, China. *ScienceDirect*, 168-175.
- Weng, Q. (2009). Thermal infrared remote sensing for urban climate and environmental studies: Methods, applications, and trends. *Elsevier*, 335-344.
- Wenze Yue, Y. L. (2012). Assessing spatial pattern of urban thermal environment in Shanghai, China. *Springerlink*, 899-911.
- Ya Ma, Y. K. (2010). Coupling urbanization analyses for studying urban thermal environment and its interplay with biophysical parameters based on TM/ETM+ imagery. *ElSevier*, 110-118.
- Ye Caihua, L. Y. (2011). Application of Urban Thermal Environment Monitoring Based on Remote Sensing in Beijing. *Environmental Sciences* , 1424-1433.
- Yue, W.-Z. L. (2016). Assessment on heat island effect based on urban regulatory planning. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 3631-3640.
- Zafra, C., Temprano, J., & Tejero, I. (2017). The Physical factors affecting heavy metals accumulated in the sediments deposited on road surfaces in dry weather: A review. *Urban Water Journal*, 639-649.
- Zhang, L. W. (2014). Investigación sobre la relación entre la temperatura de la superficie y la isla de calor urbano utilizando la imagen de percepción remota por infrarrojos térmicos. *Advanced Materials Research*, 1634-1637.
- Zhang, Y. J. (2018). Study on Urban Heat Island Intensity Level Identification Based on an Improved Restricted Boltzmann Machine. *Int. J. Environ. Res. Public Health*, 186.

Condiciones e impactos sobre datos cartográficos en Colombia Conditions and impacts on cartographic data in Colombia

Received: 02 02 2024, Accepted: 21 06 2024, Available online: 08 07 2024

William Fernando Vásquez
Ingeniería topográfica; Integrante semillero de investigación TOPOCOORS, Facultad de Medio Ambiente y recursos Naturales.
Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Bogotá D.C., Colombia. wvasquezm@correo.udistrital.edu.co

Blanca Cecilia Fulano-Vargas
Msc Educación Universidad de los Andes, Docente Secretaria de Educación de Bogotá, Doctora en Educación UBC,
Miembro Grupo de Investigación Foraved , Bogotá D.C., Colombia. blancafulano@yahoo.com
ORCID [https:// 0000-0001-6355-0278](https://0000-0001-6355-0278)

Carlos Fabian Rico
Grupo de investigación GICOF. Contador publicó universidad Francisco de Paula Santander. Esp. en gestión humana de la universidad
EAN, Magister en administración de empresas - MBA de la universidad EAN. Carlosfabianrr@ufps.edu.co
ORCID <https://orcid.org/0000-0002-0834-0339>

Resumen:

Mantener el control sobre los datos cartográficos y geográficos de un país es muy importante teniendo en cuenta que la información que se genera tendrá influencia en básicamente todos los trabajos relacionados con la administración del territorio. En Colombia, se emitió la Resolución del IGAC 471 el 14 de mayo de 2020, reestructurando todo el sistema con el que se venía trabajando (orígenes locales y Gauss Krüger) y se cambió por un Nuevo Origen Único de coordenadas (CTM12), con el objetivo de unificar los trabajos y minimizar las inconsistencias que se daban con la proyección de los seis orígenes. Es cierto que con cada sistema existe un cambio significativo en valores de áreas y distancias, a esto se le suma que muchos levantamientos topográficos se generan con origen arbitrario, dificultando así la labor de los entes de control nacional, por esta razón se propone la verificación de métodos de levantamientos topográficos no convencionales que permitan generar planos topográficos ligados al nuevo sistema único nacional, el cual agilice procesos de recolección de información, y tenga un impacto considerable en lo que hoy se denomina catastro multipropósito y todo lo que abarca, por lo que se dan argumentos de peso y una postura crítica respecto a las ventajas que supuestamente se afirman.

PALABRAS CLAVE: Geodesia, Proyecciones y Parámetros, Cartografía, Sistemas de Coordenadas, Administración del Territorio, Sistemas de Información Geográfica, Catastro.

Abstract

Maintaining control over the cartographic and geographical data of a country is very important taking into account that the information generated will influence basically all work related to the administration of the territory. In Colombia, IGAC Resolution 471 was issued on May 14, 2020, restructuring the entire system with which it had been working (local origins and Gauss Krüger) and was changed to a New Single Origin of coordinates (CTM12), with the objective of unifying the works and minimizing the inconsistencies that occurred with the projection of the six origins. It is true that with each system there is a significant change in values of areas and distances, to this is added that many topographic surveys are generated with arbitrary origin, thus making the work of national control entities difficult, for this reason verification is proposed. of non-conventional topographic surveying methods that allow the generation of topographic plans linked to the new single national system, which speeds up information collection processes, and has a considerable impact on what is today called multipurpose cadastre and everything it encompasses, so Strong arguments and a critical stance are given regarding the advantages that are supposedly claimed.

KEYWORDS: Geodesy, Projections and Parameters, Cartography, Coordinate Systems, Territorial Administration, Geographic Information Systems, Cadastre.

1. Introducción

Desde que se expidió la Resolución del IGAC 471 el 14 de mayo de 2020, han sido bastantes las respuestas y puntos de vista de varios sectores tanto laborales como académicos que cuestionan la implementación del Nuevo Sistema de Proyección Cartográfico para Colombia (CTM-12); definitivamente es un tema bastante amplio que requiere completa atención, ya que tiene un impacto profundo en los proyectos ingenieriles del territorio nacional.

los resultados que se obtengan aplicando la proyección, notando que tan ciertas son las afecciones que se puedan

tener dentro de la sociedad; son muchos los sectores que están reconsiderando lo planteado por le entidad competente, presentándose espacios en los cuales se deja en evidencia los factores que necesitan ser reformados en el nuevo sistema para que de esta manera se acepte completamente este cambio radical, ya que ha traído descontento en gran parte del gremio, por lo que es preciso hacer las debidas consideraciones y apuntes respecto al objeto y alcance de la normativa actualmente vigente.

Siempre ha existido la necesidad de representar el territorio de manera práctica y precisa, por lo que están en constante evolución los parámetros que permiten llevar a cabo los procesos de producción de información geográfica y cartográfica oficial. El IGAC (Instituto Geográfico Agustín Codazzi), ha sido el encargado de realizar esta tarea ardua, para que en el país se implemente unificadamente la información en los trabajos de índole geográfico. Se han presentado distintas resoluciones con las técnicas para la producción de dicha información georreferenciada, implementando las denominadas proyecciones cartográficas, permitiendo representar la superficie a través de métodos matemáticos sobre un plano de referencia, solucionando varios conflictos, aunque se hace un aproximado de la realidad debido a que no existe actualmente una metodología de proyección que sea completamente perfecta y que no distorsione la realidad.

Con las proyecciones, es determinante hacer la representación de la tierra de su forma elipsoidal a través de diferentes figuras geométricas donde se pueda lograr la menor distorsión en cuanto a forma, distancia y área. Colombia venía trabajando con los seis (6) orígenes –

Gauss-Krüger, y dependiendo del tipo y finalidad del trabajo se hace uso de una proyección determinada, en casos puntuales se implementan las llamadas proyecciones locales, aplicadas para precisiones milimétricas. El presente estudio se da en el centro del país, seleccionando un predio ubicado en el departamento de Cundinamarca, empleando métodos de levantamientos topográficos convencionales, y comparándolo con un método propuesto, determinando diferencias en áreas y formas, empleando el nuevo sistema de proyección en ambos casos.

Las especificaciones técnicas aplicadas en la Resolución 471 se basan principalmente por los trabajos que se vienen desarrollando en Colombia con respecto a la Administración de Tierras y adaptando el Catastro Multipropósito como un instrumento primordial. La postura del IGAC ha sido sumamente positiva, mencionando los beneficios de la proyección cartográfica, como la fácil integración de una única base de datos, que reduce la dificultad en el procesamiento de la información con las anteriores proyecciones, entre otras; es válido aclarar, que hubieron intereses de por medio ya que con respecto a otros análisis que se han manifestado, hay una grave inexactitud con los valores resultantes que se están generando con el Origen Nacional y es que, la variación que se presenta en áreas es considerable, lo que la ha puesto en duda con respecto a su viabilidad en un futuro, no solo en la parte cartográfica sino a nivel social, económico, ingenieril, administrativo y jurídico, en la gestión del territorio ya que repercute directamente en cada aspecto. Llevar a cabo el análisis permite darle una oportunidad al nuevo sistema, donde se pueda exponer de manera congruente los resultados que se obtengan aplicando la proyección, notando que tan ciertas son las afectaciones que se puedan tener dentro de la sociedad; son muchos los sectores que están reconsiderando lo planteado por le entidad competente, presentándose espacios en los cuales se deja en evidencia los factores que necesitan ser reformados en el nuevo sistema para que de esta manera se acepte completamente este cambio radical, ya que ha traído descontento en gran parte del gremio; por lo que es preciso hacer las debidas consideraciones y apuntes respecto al objeto y alcance de la normativa actualmente vigente.

2. Revisión de literatura

Para empezar, siguiendo la definición de GeoEnciclopedia (s.f.), la cartografía es un arte, una ciencia y una tecnología encargada de la elaboración y estudio de mapas como

documentos científicos. Dichos mapas permiten representar las características geográficas, geológicas y geopolíticas de los territorios para su delimitación, identificación, ubicación y medición de distancias entre lugares. En este sentido, la cartografía es fundamental para las actividades globales y locales del ser humano, ya que alguna tarea relacionada con el comercio internacional, los viajes intercontinentales o el turismo entre ciudades -por ejemplo-, requieren un mínimo conocimiento de la ubicación de y entre sitios. Cabe señalar, que esta disciplina ha expandido su producción al ámbito digital mediante los avances científicos y tecnológicos de los últimos 3 siglos, los cuales permiten una recolección y compilación de datos en una imagen virtual más precisa (Ingeoexpert, 2019). Sin embargo, para comprender a mayor profundidad los cambios y repercusiones de la cartografía en la cotidianidad, es necesario remontarse a su origen y configuración histórica.

La cartografía científica, se considera que surgió en Mesopotamia, la Antigua Grecia y Roma hacia el 3000 a. C. con la curiosidad y necesidad del ser humano de plasmar y explorar la realidad física para establecer vínculos con lugares de diversas distancias (Porro, 2011). Por ejemplo, el instaurar rutas comerciales o de conquista, implicó el uso de herramientas que lograran percibir los lugares con mayor exactitud, como los mapas. Es así como los sumerios y acadios dibujaron croquis locales; los babilonios posicionaban a Babilonia en el centro del mundo conocido; mientras que personajes y escuelas griegas como Anaximandro, Heródoto, Eratóstenes, Tales y Hecateo de Mileto, Claudio Ptolomeo y la Escuela Jónica desarrollaron mapas más precisos (Raffino, 2020; GeoEnciclopedia, s.f.).

Con respecto a estos últimos, se considera que su cartografía llegó a niveles de perfección que no volvieron a ser igualados hasta el siglo XV, ya que utilizaron el *logos* y las matemáticas para su elaboración (aunque la idea general del mundo de la que partían no era muy distinta de la de los babilonios). Fueron los sabios cosmógrafos, astrónomos, filósofos y matemáticos los que establecieron las primeras directrices para la representación científica de la superficie terrestre. Los griegos, admitieron la forma esférica de la Tierra, sus polos, su ecuador y sus trópicos; introdujeron el sistema de longitudes y latitudes; y, construyeron las primeras proyecciones calculando el tamaño del planeta (Porro, 2011; GeoEnciclopedia, s.f.).

En la Antigua Grecia, el mundo conocido hasta entonces o *ecúmene* puede comprenderse en parte mediante la literatura de la época. Por ejemplo, los poemas iniciales de Homero ilustran el periodo de la civilización micénica su continuación y corrección correspondiente al siglo IX; mientras que la *Iliada* y la *Odisea*, enmarcan acciones heroicas en un contorno geográfico que describe a la tierra como una inmensa isla sobre un río gigantesco -océanos-, de riberas ilimitadas cuyos centros ocupan el Mar Egeo y sus pequeñas islas, hallándose a la derecha de las costas jónicas y, a la izquierda, el territorio heleno. La *Iliada*, puntualmente realiza una descripción de los países del mar Egeo; y la *Odisea* hace referencia a comarcas mucho más lejanas: Sicania (Sicilia), Temesa (en la Italia Meridional) y Egipto, las cuáles conducen desde el Mar de Oriente (Mar Negro), al Mar de Occidente (Mar Adriático), siguiendo el océano hasta el Norte de la tierra (Geomarketing, 2018; Porro, 2011). Por otra parte, a partir de la escritura del momento, se observa que para el siglo V y principio del IV a.C., ya se afirmaba que la ecúmene era de forma más o menos oblonga, con el eje Este-Oeste de doble longitud del Norte-Sur, nuestros términos de longitud y latitud son reminiscencias de este concepto (Porro, 2011).

Por otra parte, se encuentra también evidencia del conocimiento, concepción y representación del mundo físico a través de la filosofía. Por ejemplo, Tales de Mileto (624-546 a.C.), es considerado como el primer filósofo que fundó la ciencia del Cosmos estudiando a la tierra en su totalidad y en sus partes, intentando representarla en un globo de a pies de diámetro; disponiendo en el hemisferio superior la parte habitada y, en el hemisferio inferior, el océano.¹ Tales, aunque se mantuvo dentro de las coordenadas del pensamiento cosmológico tradicional, rompió mediante sus explicaciones y concepciones míticas con las nociones del origen y la configuración del Universo. Pues, creía que la tierra era el resultado de una acumulación de materia cuyo origen estaba en el agua, fuente de todas las cosas, y sobre la cual permanecía en forma discoidal. Bajo esta forma de concebir y explicar el mundo, Tales fundó posteriormente la Escuela Jónica, que a través de diferentes reflexiones y observaciones consideró a la tierra plana y circular, es decir, como un disco flotando entre las aguas en posición fija y cubierta por la bóveda celeste móvil. Así mismo, esta escuela creía que la luna, los planetas y el sol giraban a su alrededor, siendo este último el que realizaba su movimiento diario al salir por el este y ponerse por el oeste (Porro, 2011).

¹ Entonces quedaba situado el tártaro en el interior del globo, en donde los geólogos ubicaron el núcleo central incandescente, coincidencia curiosa en la que revive lo esencial de las ciencias antiguas.

Años más tarde, los conocimientos y desarrollos de Anaximandro (615-546 a.C) fueron claves para la revolución de la geografía y cartografía de la época. Investigadores como Gustavo Buzai (2017) creen que el primer mapa que representaba el mundo conocido fue realizado en el siglo VI a.C. por el discípulo de Tales: Anaximandro, quien plasmó la tierra de forma circular y mostraba el mundo conocido agrupado en torno al mar Egeo y rodeado por el océano. Anaximandro, tenía una peculiar concepción de la estructura terrestre, pues pensaba que la forma de la tierra era parecida a un cilindro, cuya altura valía un tercio de la anchura. En contra de lo que suponía Tales, Anaximandro sostenía que la tierra no flotaba sobre el agua, sino que, debido a que se encontraba a igual distancia de los demás cuerpos, se mantenía sin soporte ni apoyo, en perfecto equilibrio en el espacio. Estas afirmaciones fueron seguidas y admitidas hasta la revolución de Copérnico en el renacimiento² (Porro, 2011; Buzai, 2017).

También pertenece a la escuela jónica, Hecateo de Mileto (550-476 a.C), considerado como el padre de la Geografía, por perfeccionar el mapa de su conciudadano y redactar una descripción sistemática del mundo, de la que se conservan pocos fragmentos y algunas anotaciones (aunque bastantes como para poder reconstruir un mapa con cierta aproximación). Hecateo consideraba a la Tierra como un disco, cuyo alrededor estaban las aguas de los océanos. Así mismo, este filósofo incluyó en su tratado *“Periplos”* un mapa, que es el segundo de los conocimientos del mundo heleno y que relata una significativa anécdota: Hacia el año 500 a.C. Aristágoras de Mileto, había hallado refugio en Esparta en el curso de la guerra greco-persa,³ e indujo al rey lacedemonio Cleomenes a combatir al emperador medo. Para apoyar su pretensión mostró un “mapa de hierro”, en el cual se precisaban diáfamanamente las tierras comprendidas entre las costas Jónicas y Cusa, la capital del imperio persa (Buzai, 2017; Porro, 2011).

Esta idea presocrática del mundo se completa con la visión de Heródoto (484-424 a.C.), infatigable viajero, a quien se le debe muchos conocimientos de la antigüedad griega. Este historiador y contradictor del pensamiento anterior, acumuló todos los datos geográficos que su inquieto espíritu pudo conocer, para fortalecer su posición crítica que queda patente en sus relatos: *“me río de ver que gran*

número de gentes ha dibujado antiguamente las cartas de la Tierra y ninguna de ellas ha tratado la cuestión de una manera inteligente, dado que presentaban el Océano como corriendo alrededor de la Tierra y atribuyen a Asia una grandeza igual a la de Europa” Buzai citando a Herodoto; 2017; 43). Herodoto amplió los límites de la ecúmene a nuevos espacios ya que estudió en sus viajes los países de la cuenca oriental del Mediterráneo: los lugares extremos que alcanzó fueron la baja Italia y Sicilia, Dodona, el Bósforo, Susa y Egipto hasta el Sur de Elefantina, corrigiendo esencialmente las representaciones de los mapas; así dio a Europa una extensión mayor hacia el Norte y reconoció el Caspio como un mar cerrado, en contradicción de sus predecesores, que lo hacían un golfo de Océanos. También llegó muy lejos al Oriente de Asia, hasta la patria de los Indos y no fue más allá detenido por el desierto. Sin embargo, a pesar de su actitud crítica y su vasta cultura, no pudo reemplazar el viejo sistema geográfico de los jonios (Buzai, 2017; Porro, 2011; Raffino, 2020).

Citando otro ejemplo, hacia el año 350 a.C. Aristóteles (382-322 a.C.) pudo formular seis argumentos que demostraban que la tierra era realmente esférica, pues mediante observaciones y cálculos midió exactamente la oblicuidad del eje del planeta; estableciendo consigo los conceptos de “ecuador”, “polos” y “trópicos” de manera somera, y dividió la superficie terrestre en zonas tórridas templadas y frías, al igual que hoy en día (Colección Cartografía Antigua, s.f.; Doble, 2004). Posteriormente, un discípulo de Aristóteles llamado, Dicearco (350-290 a.C.), fue el autor de una célebre carta y creador de un simplificado sistema de coordenadas geográficas a partir del trazado de una línea directriz equidistante entre el Norte y el Sur, que divide igualmente la superficie de la Tierra en una parte “septentrional” y una “meridional”. Esta línea, a la que Dicearco llamó “diafragma” se alargaba de Oriente a Occidente pasando por Cádiz, Sicilia, el Peloponeso y la isla de Rodas; mientras que la otra perpendicular a esta, cruzaba la tierra de Norte a Sur (a la altura de esta última). Ambas estaban divididas en “estadios”, y la dimensión de la circunferencia total terrestre se calculó en 300.000 km (Porro, 2011; Doble, 2004).

Por otra parte, se encuentra la figura de Eratóstenes⁴ (276-194 a.C.) geógrafo, matemático, astrónomo, poeta y

² Movimiento cultural producido en la Europa Occidental durante los siglos XV y XVI, el cual, retomó las ideas de la tradición grecorromana para la superación del “oscurantismo” medieval.

³ También llamadas “Guerras médicas”, basadas en conflictos entre el Imperio Aqueménida de Persia y las polis del mundo Helénico. Estas guerras comenzaron en el 490 a.C. y finalizaron hasta el 449 a. C.

⁴ Algunos de sus contemporáneos le dieron el nombre de “pentatlos” que se aplicaba a los atletas que vencían en las cinco luchas de los juegos olímpicos.

filósofo que realizó hacia el año 200 a.C. uno de los mapas más famosos de la época clásica, pues representaba el mundo conocido desde Gran Bretaña, al noroeste, la desembocadura del río Ganges, al este, y hasta Libia (África) al sur. Este mapa fue el primero en el que aparecieron las líneas paralelas transversales para señalar los puntos con la misma latitud, y algunos meridianos, -aunque éstos últimos tenían una separación irregular-. También, en el siglo III a.C. Eratóstenes de Cirene, obtuvo la primera medida científica de la circunferencia terrestre, al comprobar cómo el día del solsticio de verano no distaba del cenit más que la quincuagésima parte de la circunferencia del gran círculo de la esfera. Según la tradición, había un pozo en Siena (Asuan) cuyo fondo sólo llegaban los rayos del sol del 20 al 22 de junio. Ello significaba que Siena estaba situada en el “Trópico de Cáncer” y como quiera que se conocía la distancia entre Siena y Alejandría, -que era de 500 estadios, y en el supuesto de que esta última ciudad estuviera situada al norte de Siena-, lo que hizo Eratóstenes fue medir el ángulo del sol al mediodía del 21 de junio, encontrándose que la inclinación de los rayos solares respecto de la vertical en Alejandría era una cincuentava parte del círculo (unos 7 grados aproximadamente). Por tanto, un meridiano de la Tierra tendría que medir cincuenta veces más, es decir, 250.000 estadios. La compensación de sus errores le condujo a una precisión sorprendente; 250.000 estadios, es decir, 39.750 km para un valor real de 40.000 km en la circunferencia de la tierra ⁵(Buzai, 2017; Colección Cartografía Antigua, s.f.; Porro, 2011; Piqueras, 2016).

Ahora bien, el apogeo de la cartografía griega está unido al nombre de Claudio Ptolomeo de Alejandría (90 a 168 a. C.). Muy poco se sabe de su persona, pero su obra ha tenido sobre la Cartografía y sobre la Geografía en general más trascendencia que ninguna otra. Fundamentalmente astrónomo y matemático, mostró escaso interés por los problemas prácticos y humanos de la Geografía. Su famosa Geografía se compone de ocho volúmenes, el primero de los cuales está dedicado más que nada a principios teóricos, con un tratado sobre construcción de globos y la técnica de proyección de mapas. Los libros 1 a VII contienen una relación de unos 8.000 nombres de lugares con latitudes y longitudes para determinar su posición. Muy poca de estas situaciones estaba calculada por observaciones o deducidas científicamente: coordenadas habían sido, desde luego, tomadas de mapas anteriores. El volumen más importante es el VIII, que contiene el estudio sobre los principios de la Cartografía, de la Geografía matemática, de las proyecciones y de los métodos de observación astronómica. También contiene instrucciones

detalladas sobre la manera de construir un mapa-mundi. Por otra parte, El texto de la *Geographia de Ptolomeo* iba acompañado, en la mayor parte de los manuscritos, de un mapa-mundi y de 26 mapas detallados. No se sabe si los preparó el mismo Ptolomeo, pero en su forma original proceden de los tiempos clásicos y constituyen el primer atlas universal. El mapa de Ptolomeo que se conoce actualmente, es la obra de los bizantinos del siglo XI, según Bagrow (Buzai, 2017; Colección Cartografía Antigua, s.f.; Porro, 2011; Piqueras, 2016; GeoEnciclopeia, s.f.).

Otro aspecto a destacar, es que para Ptolomeo los grados de latitud y longitud están inclinados por una escala en uno de los lados y el sistema de climas en el otro. Los climas son paralelos que dan la duración creciente del día más largo a contar desde el ecuador (12 horas), hasta el círculo polar ártico (42 horas). Así mismo el mundo conocido por Ptolomeo abarca 180° de longitud desde un meridiano inicial (0°) que pasaba por las islas Afortunadas hasta China. El mapa está orientado al Norte, y en él están indicados el ecuador y los trópicos, estando representada la latitud de los trópicos por 23°51'. Sin embargo, es importante destacar que a pesar de la importancia del mapa de Ptolomeo, este presenta errores en las partes oriental y meridional: por ejemplo, la península del Decán está reducida casi hasta desaparecer, mientras que Ceilán presenta un tamaño mucho mayor del real: la forma de África ofrece una gran particularidad; hasta el ecuador, desde la parte Norte, es bastante exacta, pero a partir de esta línea, en vez de ir contrayéndose hasta un punto se ensancha a uno y otro lado; hacia el Oeste termina bruscamente el mapa, pero hacia el Este África se une con Asia, figurando así el océano Índico como un gran lago cerrado. No se sabe a qué atribuir esta errónea representación. Muy probablemente esta idea equivocada contribuyó en gran parte al retraso en el intento de llegar al Asia bordeando las costas de África (Buzai, 2017; Colección Cartografía Antigua, s.f.; Porro, 2011).

Pero el error más importante de Ptolomeo fue el de haber apreciado muy por bajo el valor de las dimensiones de la Tierra, error que reforzó la creencia de Colón de que podría llegar a Asia navegando hacia el Oeste. Admitiendo la equivalencia de Posidonio (10=500 estadios), y aplicándola a las medidas de distancia de que disponía, dedujo, -como se ha visto-, que Europa y Asia se extendían sobre la mitad de toda la longitud terrestre, cuando en realidad sólo cubren unos 130°. Del mismo modo, la longitud del Mediterráneo aparece como de 62°, siendo en realidad solo de 42°. Aunque los geógrafos árabes y los cartógrafos marinos del siglo XIII corrigieron esta deformación,

⁵ En la actualidad son 40 008 km, es decir, un error de menos del 1 %.

continuó figurando en la cartografía europea hasta 1700 (Porro, 2011; Piqueras, 2016; GeoEnciclopeia, s.f.). A pesar de estos errores, es menester mencionar que Ptolomeo marca el punto culminante de la cartografía del mundo antiguo, que no llegó a igualarse -según algunos expertos- hasta bien adentrados a la modernidad. Aun cuando la geografía siguió estudiándose y aplicándose en el mundo árabe, llegó un punto en el que desapareció de Europa Occidental y no se volvió a hacer uso de ella hasta el siglo XV (Buzai, 2017; Colección Cartografía Antigua, s.f.; Porro, 2011; Piqueras, 2016).

Por otra parte, Con la llegada de Cristóbal Colon se simbolizó el territorio de las Américas por medio de cartas donde se representaban las costas y la parte litoral principalmente, todo esto para ser usadas en navegación. A partir de entonces, para comprender la estructura del territorio se crean mapas y planos que han permitido el desarrollo multidisciplinario desde los tiempos de la colonización, el virreinato y actualmente, cada vez más cambiante, con técnicas que se van renovando con el paso del tiempo. Básicamente la cartografía ha estado presente desde hace bastante tiempo en el territorio del país y por eso, hoy en día instituciones como el IGAC han desarrollado múltiples metodologías y normas que se aplican en proyectos a fines.

En 1910 se dictó una resolución donde se debía desarrollar una red astronómica que cubriera la mayor parte del país para así fijar los lugares con coordenadas geográficas con valores aceptables por la norma, dando paso a la obtención de una proyección que mediante un caneavá científico apoyara la elaboración de mapas y con esto la continuación con la red geodésica. Ya para 1918, se hace la publicación de los mapas que se realizaron, estos sobre una proyección sinusoidal en escala 1:500.000 permitiendo obtener muchos detalles. “Por Decreto de 30 de agosto de 1934 se aprobó el plan de un INSTITUTO con elementos y procedimientos modernos para el levantamiento geográfico del mapa de Colombia, en su totalidad y en partes, presentado por el Dr. Belisario Ruiz (Wilches G. J., 2020)

Más adelante para 1935, empezó la construcción del anterior instituto llevando primeramente el nombre de INSTITUTO GEOGRAFICO MILITAR, luego INSTITUTO GEOGRAFICO MILITAR Y CATASTRAL para finalmente obtener el nombre que recibe actualmente de INSTITUTO GEOGRAFICO AGUSTIN CODAZZI. Donde se emplearon nuevas disciplinas como la aerofotografía y las triangulaciones geodésicas, con los equipos más sofisticados de la época, elaborando con estos

las cartas y planchas que continuamente se fueron publicando, hasta que se empleó el sistema cartográfico de GAUSS.

2.1 Sistema de referencia.

Es el conjunto de conceptos teóricos los cuales permiten definir la dirección, ubicación y escala de los tres ejes coordenados (X, Y, Z), este es materializado mediante puntos con coordenadas reales de un marco de referencia. En geodesia el sistema geocéntrico utilizado es el Sistema Internacional de Referencia Terrestre (ITRS), definiéndolo con un origen en el centro de las masas terrestres; la materialización del mismo, se da con el Marco Internacional de Referencia Terrestre (ITRF) con coordenadas cartesianas geocéntricas y velocidades, que se dan de estaciones observadas por medio de técnicas geodésicas de alta precisión.

En el continente americano, el ITRF se densifico con el Sistema de Referencia Geocéntrico para las Américas (SIRGAS), conformado por una red de al menos 180 estaciones geodésicas con un cubrimiento continuo del continente. En la Ilustración 1, se ve el resultado de una red distribuida sobre el continente (183 estaciones), con coordenadas en ITRF2000, época 2000.4.



Ilustración 1 Sistema de Referencia Geocéntrico para las Américas

El datum geodésico correspondiente está definido a partir de los parámetros del elipsoide GRS80, orientado según los ejes coordenados del sistema de referencia Sirgas, equivalente al ITRF94.

Por las condiciones técnicas, en Colombia es densificado para cumplir con las precisiones geodésicas; por lo cual el IGAC, estableció a partir de SIRGAS una Red Básica de GPS, El Marco Geocéntrico Nacional de Referencia

(MAGNA), conformada con alrededor de 70 estaciones GPS, como se ver en la Ilustración 2.

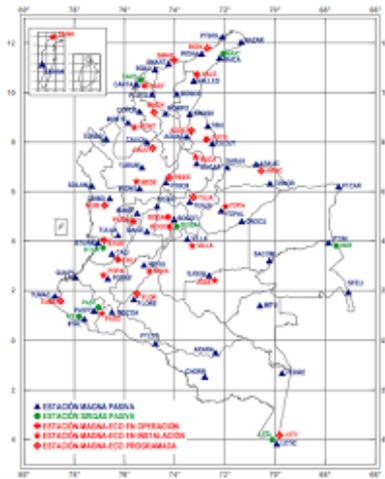
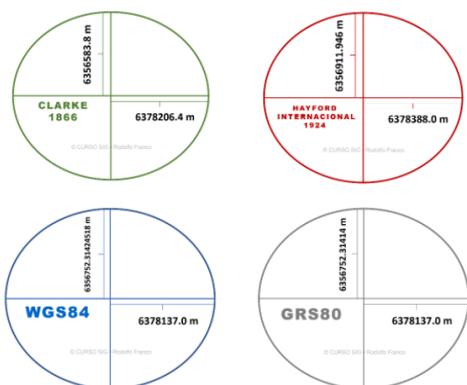


Ilustración 2 Sistema MAGNA-SIRGAS – Red Básica GPS y estaciones de funcionamiento continuo (estado a septiembre de 2004).

2.2 Esferoides.

La tierra en su forma presenta un achatamiento en la zona de los polos y es bien sabido que la figura geométrica que mejor lo representa en un elipsoide de revolución que se forma por la rotación de una elipse sobre un eje menor, la forma de una elipse está definida por dos radios uno el semieje mayor que es el radio más largo y el semieje menor con el radio más corto. La tierra se ha examinado varias veces por lo que se han calculado diferentes valores a las dimensiones del elipsoide, adaptándose a un país o área que se utilizan dependiendo si es conveniente debido a que puede ser apto en una región mientras que en otra no, sin embargo, con la tecnología satelital se han reemplazado los antiguos esferoides. A continuación, en la Ilustración 3, se presentan algunos de los esferoides con los valores de semieje mayor y semieje menor:



⁶ El Sistema Geodésico de Referencia de 1980 (GRS 1980), cuyos radios son 6.378.137,0 y 6.356.752,31414 metros.

Ilustración 3 Ejemplos elipsoides de revolución con dimensiones de los ejes.

En el 2005 Colombia comenzó a asociarse con el esferoide GRS80⁶, teniendo en cuenta que anteriormente se usaba el Hayford internacional, las dimensiones del anterior se pueden denotar en la Ilustración 3 trazado con un color rojo oscuro.

Datum geodésico.

Es el sistema de referencia espacial por el cual se determina la forma y el tamaño de la tierra, quiere decir que son un conjunto de parámetros que determinan las dimensiones de un elipsoide. En este caso un Datum puede ser local, quiere decir que el elipsoide coincide con un punto específico de un determinado lugar, como era el caso antiguo datum Bogotá o puede también darse un datum geocéntrico basándose en el centro de masa terrestre, empleado actualmente con tecnología de posicionamiento satelital.

En Colombia se hizo una actualización con la resolución IGAC 715 del 8 de junio de 2018, donde la adaptación de MAGNA-SIRGAS del 2005 con materialización ITRF94 y época de referencia 1995.4, modificando al ITRF2014 con época de referencia 2018.0.

Actualmente el datum MAGNA-SIRGAS se mantienen los parámetros para el Origen Nacional que fue establecido en mayo de 2020, teniendo en cuenta que es usado de igual manera para el anterior sistema de coordenadas con los seis orígenes.

2.3 Sistema de coordenadas proyectadas

Este se define en un plano quiere decir una superficie bidimensional y a diferencia de un sistema geográfico, se tienen ángulos, longitudes y áreas. El proceso que se da matemáticamente para hacer la conversión de un espacio tridimensional y uno bidimensional, se conoce como proyección. Existen varios tipos de proyecciones según la superficie de representación son tres tipos de proyección básica: la cónica, la cilíndrica y la azimutal. Se caracterizan principalmente para realizar mapas, en zonas polares se utiliza la proyección azimutal, las cónicas son para las zonas templadas y ya para la región ecuatorial se emplean las cilíndricas. Según la región, se decide que proyección reduce la distorsión teniendo en cuenta que tienen propiedades, donde se mantengan las distancias

(equidistantes), se mantengan las superficies (equivalentes) o las formas (conformes), sin distorsión. Transversa de Mercator es la proyección que se emplea en Colombia, caracterizada por ser de tipo cilíndrica transversal y que mantiene las formas quiere decir conforme pero que se comienzan a evidenciar las distorsiones en la medida que se alejen del punto de relación entre el elipsoide y el cilindro. Anteriormente, de acuerdo con el IGA “Para la representación de las coordenadas geográficas en un plano, la proyección cartográfica oficial utilizada en Colombia hasta el año 2020 es Gauss-Krüger (Instituto Geográfico Agustín Codazzi, 2004), Datum MAGNA SIRGAS.

La proyección cartográfica Gauss-Krüger es conforme del elipsoide sobre un plano, lo que significa que el ángulo formado entre dos líneas sobre la superficie es constante al ser las mismas proyectadas sobre un plano; en lo que respecta a los meridianos y paralelos se interceptan perpendicularmente, no como líneas rectas sino curvas complejas, a excepción del meridiano central que es el de tangencia con el paralelo de referencia como se puede observar en la Ilustración 4.

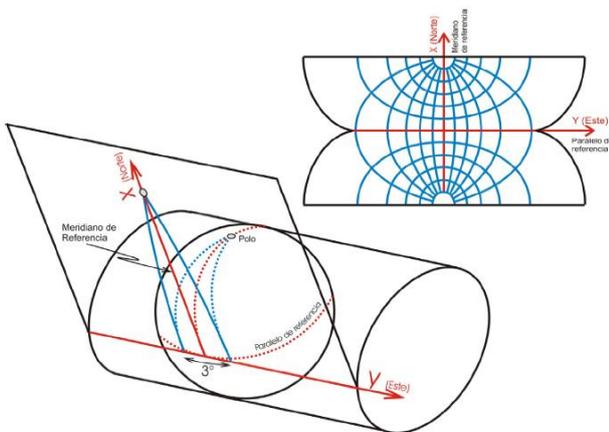


Ilustración 4 Sistema de proyección cartográfica Gauss-Krüger.

El sistema de proyección UTM (Universal Transverse Mercator), corresponde con Gauss-Krüger solo que este hace el uso de un factor de escala que equivale a $m = 0.9996$ para el meridiano central y husos de seis grados (6°), divididos en tres cada uno. En el país, mediante la Resolución IGAC 0399 del 2011 se hizo la adaptación de la proyección conforme Gauss-Krüger con proyección Transversa de Mercator de tipo tangente; con la nueva propuesta del Origen Nacional pasara a ser de tipo secante.

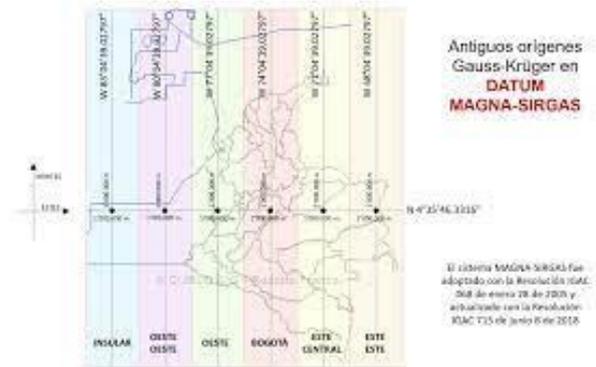


Ilustración 5 Antiguos Orígenes Gauss-Krüger en Datum MAGNA-SIRGAS.

El origen anterior de las coordenadas Gauss-Krüger se determinó en el Observatorio Astronómico de Bogotá en la pilastra sur y los valores que se le dieron a la Norte y Este fue de $1'000.000$ m; para los orígenes, como se plantea en la ilustración 5 se estableció 3° y 6° de longitud al este como al oeste del punto central (el intervalo de cada zona para el eje de las Estés se daba entre 835.000 m y $1'170.000$ m). Este sistema se usó para elaborar la cartografía a escala menor a $1:150000$, También se utiliza para cartografía a escalas entre $1:10000$ y $1:500000$ de las comarcas.

Origen	Coordenadas Elipsoidales		Coordenadas Gauss-Krüger	
	Latitud (N)	Longitud (W)	Norte [m]	Este [m]
Bogotá - BOGOTÁ	$04^\circ 35' 56.57''$	$74^\circ 04' 51.30''$	1 000 000,0	1 000 000,0
Este Central - BOGOTÁ	$04^\circ 35' 56.57''$	$71^\circ 04' 51.30''$	1 000 000,0	1 000 000,0
Este Este - BOGOTÁ	$04^\circ 35' 56.57''$	$68^\circ 04' 51.30''$	1 000 000,0	1 000 000,0
Oeste - BOGOTÁ	$04^\circ 35' 56.57''$	$77^\circ 04' 51.30''$	1 000 000,0	1 000 000,0
Oeste Oeste - BOGOTÁ	$04^\circ 35' 56.57''$	$80^\circ 04' 51.30''$	1 000 000,0	1 000 000,0

Tabla 1 Coordenadas MAGNA-SIRGAS de los orígenes de las zonas de proyección Gauss-Krüger en Colombia

De acuerdo con la Resolución IGAC 068 del 28 de enero de 2005, se adaptó el sistema coordenado con el Datum MAGNA-SIRGAS (en la Tabla 1 se visualizan las coordenadas de los orígenes zonales) y los seis orígenes reemplazaron el viejo Datum Bogotá por el hecho de que se volvió afuncional con las tecnologías de posicionamiento actuales (Instituto Geográfico Agustín Codazzi, 2005)). El Datum Bogotá como el sistema Gauss, empleaba los mismos orígenes con la diferencia de que el esferoide usado eran el Hayford (1924) y como es no geocéntrico ocasionaba que este fuera impreciso, a diferencia de los parámetros y técnicas que se emplean con los esferoides geocéntricos, el caso del GRS80 y el WGS84; tanto es así, que el uso de dos diferentes

esferoides alteraba las posiciones por lo que el viejo Datum Bogotá se desplazaba considerablemente segundo de arco con respecto al MAGNA-SIRGAS, lo que quiere decir es que proyectados representan varios metros significativos; en la Tabla 2 se pueden observar las coordenadas que tenían cada una de las zonas de origen que se determinaron para el Datum Bogotá con la proyección de Gauss.

Dentro de los orígenes, se menciona uno sexto, conocido como insular que también se empleaba antes de que se presentara la adopción del MAGNA-SIRGAS, sin embargo, se formalizó con la Resolución IGAC 0399 de junio 8 de 2011 que fue publicada en el Diario Oficial, donde se relaciona oficialmente los orígenes cartográficos para la proyección Gauss-Krüger de Colombia.

Dada la introducción de varios orígenes para llevar a cabo la representación cartográfica del territorio, se podían presentar puntos con diferente ubicación, pero con los valores de coordenadas idénticos, por lo que era de vital importancia prestar bastante atención al huso o zona en la que se encontrara el punto de trabajo para evitar los inconvenientes en la obtención de las coordenadas geográficas a partir de las planas (N, E).

Antes de la adaptación del Nuevo Origen, los seis orígenes se implementaban en la mayoría de las entidades públicas y privadas del país que crean cartografía, no obstante, en ciertos proyectos la integración de información se dificultaba teniendo en cuenta que el lugar de trabajo abarcaba área en más de una de las zonas de origen; otro caso, se da con la proyección debido a que la distorsión tendía a aumentar a medida que el área se aleja en longitud del origen. Según Rodolfo Franco, la tarea de integración de los proyectos cartográficos generaba dolores de cabeza cuando las locaciones quedaban entre una y otra zona de los orígenes y plantea algunos ejemplos donde se puede detallar el conflicto en las zonas de transición:

Según Franco, “Un caso de problema con los seis orígenes, locaciones en un mismo departamento, pero con zonas de origen distinto ocurría en el departamento de Nariño. Si el sitio de estudio se encontraba por ejemplo en manglares cerca de Tumaco le correspondía el origen Oeste-oeste, pero si estaba en el sector del Volcán Galeras le correspondía origen Oeste” (Rodolfo, F., 2020), en la Ilustración 6 se puede observar la zona de color morado como el origen Oeste y la parte restante de amarillo como Oeste-oeste.

Con la resolución IGAC 471 del 14 de mayo de 2020 fue reemplazado el sistema MAGNA.SIRGAS de seis

orígenes por un Origen Único Nacional, que busca evitar las incongruencias como el ejemplo de Tumaco, y de esta manera facilitar la producción de cartografía y darles continuidad a las coordenadas de la cartografía nacional.



Ilustración 6 Origen Oeste y Origen Oeste-oeste en Tumaco.

Para escalas grandes, se utiliza una proyección cartesiana local, ya que permite hacer una representación más detallada y se da con la ubicación de un plano elevado a una altura media de la región, siendo este paralelo a un plano tangente al elipsoide dado en un punto de origen. Con el parámetro de la altura se reduce la diferencia entre la cuadrícula y la superficie ofreciendo por tanto mediciones más cercanas a la realidad, siendo esta proyección generalmente utilizada para la creación de planos de la parte urbana (escalas mayores que 1:5000); por tal motivo la existencia de bastantes orígenes de coordenadas.

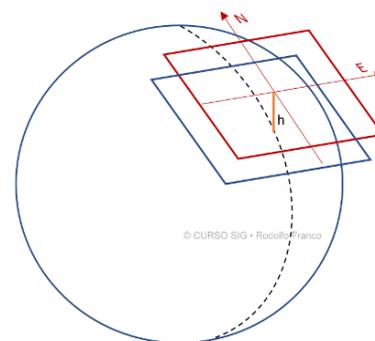


Ilustración 7 Proyección cartesiana.

2.4 Nuevo Origen Único Nacional

Para el país, se modificó el sistema de coordenadas cartográfico por lo que se actualizando los seis orígenes a el origen de proyección cartográfica Origen Nacional, mediante la Resolución IGAC 471 de mayo 14 de 2020, reglamentando el uso del Origen de Proyección Cartográfica CTM-12, donde se actualizan las especificaciones técnicas para los procesos de generación

de material cartográfico básico, esclareciendo la normativa se define por tanto en el artículo 2 “Las especificaciones técnicas de los productos de la Cartografía Básica Oficial de Colombia, son de obligatorio cumplimiento para los todos los actores, públicas o privadas, que generen cartografía para entes oficiales,” (Instituto Geográfico Agustín Codazzi, 2020).

El principal motivo por el cual el IGAC inicio el proceso de actualización, fue por la modernización que se le está dando a la administración de tierras en el país, el caso de la Infraestructura Colombiana de Datos Espaciales (ICDE) que en su momento aporó elementos para darle un nuevo enfoque al territorio y a través del denominado catastro multipropósito como instrumento indispensable; en la infraestructura de datos se tiene en cuenta la disposición y aplicación de modelos de datos con principios comunes, como se dé evidencia con Land Administration Domain Model (LADM). De esta manera, el IGAC las técnicas que acogió para darle bases al nuevo origen basándose en la información de un estudio que se dio en compañía del gobierno suizo nombrado “Propuesta de la Proyección Cartográfica única para la Administración de Tierras en Colombia Versión 2” elaborada por Dante Salvini y Fredy Alexander Bolívar en mayo del 2018 (Salvini F, & Bolivar F, 2018).

La resolución 471, por tanto, establece las especificaciones técnicas para los obtener productos de la cartografía básica oficial; En el Artículo 4 de la presente norma, en el subtítulo i Sistema de Referencia donde se detalla los nuevos parámetros de la proyección señalados en la Tabla 3 con un único origen de coordenadas⁷.

Parámetro	Valor
Proyección	Transversa de Mercator
Elipsoide	GRS80
Origen Latitud	4° N
Origen Longitud	73° W
Falso Este	5.000.000
Falso Norte	2.000.000
Unidades	Metros
Factor de Escala	0,9992

Tabla 2 Parámetros de la proyección.

En este momento, el origen único nacional se encuentra en la cercanía de Puerto López en el departamento del Meta. Para los valores de falso Norte y falso Este, impide que se presenten valores negativos y facilita la identificación de las coordenadas Nortes y Estes entre sí.

⁷ Los valores de los parámetros de la proyección cartográfica Origen Nacional ya se habían presentado en el artículo 7.2 de la Resolución 388



Ilustración 8 Origen Nacional de Coordenadas.

Para el Datum, este seguirá siendo MAGNA.SIRGAS el mismo utilizado en los seis orígenes y la proyección cartográfica es cilíndrica Transversa de Mercator, pero en este caso de tipo secante y no tangente, quiere decir que corta el esferoide por los dos lados del meridiano central. Sin embargo, una de las opciones para el origen, se daba en que coincidiría con el punto del observatorio astronómico ya materializado y una segunda opción un punto donde el origen fuese equidistante a cada extremo del territorio del país.

Lo que dio paso a que con la aplicación de la fórmula de Deakin mostrada anteriormente (Deakin, 2006), se determinara que el punto dado para origen Bogotá admite unas distorsiones en áreas mayores en las zonas que estén fuera esta franja (como se puede observar en la Ilustración 9 - grafico de la izquierda), con respecto a la proyección central (Ilustración 9 – grafico de la derecha) quedando esta como opción oficial.

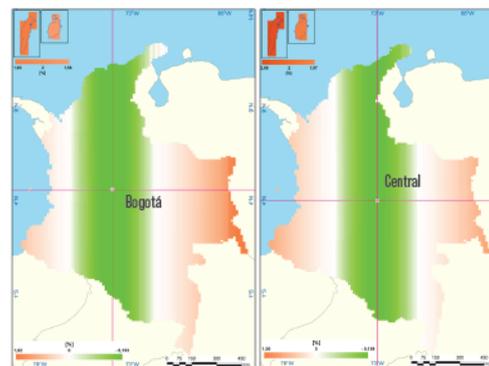


Ilustración 9 Definición del origen - Proyección CTM12 origen Bogotá y Proyección CTM12 origen Central.

de abril 13 de 2020, como especificaciones técnicas en catastro multipropósito.

Este sistema se le denominó CTM12 debido a que se definió a partir de una banda continental con un ancho de 12° de longitud.

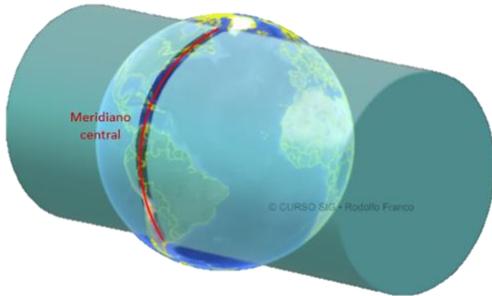


Ilustración 10 Proyección Transversa de Mercator Secante.

Durante el diseño del nuevo sistema determinaron un factor de escala (k), este es el que minimiza la suma de las distorsiones negativas y positivas desde el origen dadas a lo largo del territorio. Se tuvieron por tanto en cuenta las distorsiones que pueden ser inducidas por la misma proyección, por lo que los valores máximos de las distorsiones se dan en los puntos más distantes con respecto al meridiano central y los valores mínimos se dan sobre el meridiano central; el factor de escala óptimo tiene que minimizar la magnitud de las distorsiones anteriores para que este sea apropiado.

Se realizó el cálculo debidamente del factor de escala, partiendo desde un valor para $k=1$ hasta un valor de $k=0.9985$, considerando por tanto un factor de escala óptimo apropiado de $k=0.9992$. Definido ya el factor de escala, resulta entonces un plano secante al esferoide, dando una distorsión en áreas de cero en los dos meridianos estándar, quiere decir donde el plano de referencia corta el esferoide dado a 254 km del meridiano central⁸.

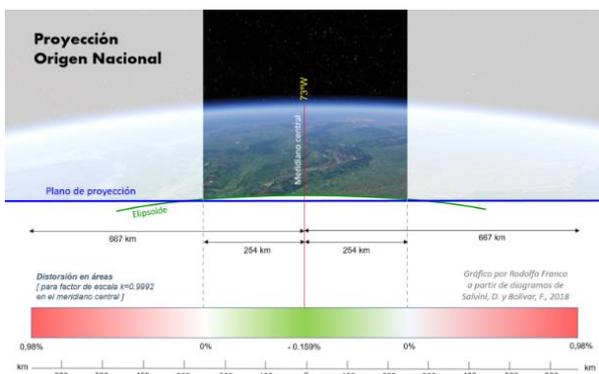


Ilustración 11 Proyección Origen Nacional.

De acuerdo con Salvini y Bolívar, la distorsión en áreas respecto al Origen Nacional, como se evidencia en la Ilustración 12 donde la línea roja hace la representación del meridiano central pasando sobre el origen y las líneas a sus lados son llamadas meridianos estándar.

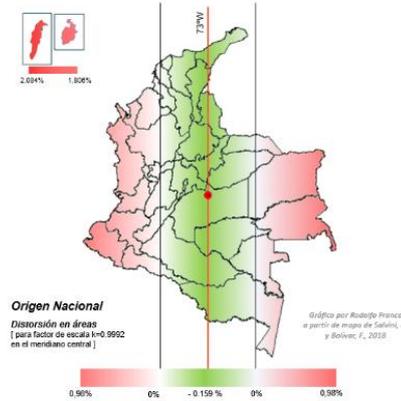


Ilustración 12 Distorsión Áreas Origen CTM12.

Se decide tener en cuenta los pesos de densidad poblacional del país como factor ponderante con datos reportados por el DANE de los censos y por el IGAC en el ámbito catastral, determinando la relación directa entre la densidad poblacional y el número de predios en el territorio. En la ilustración 13 se expone los pesos por densidad de población, donde las zonas de muy baja densidad se agrupan en las selvas de la Amazonia, Orinoquia y la Chocoana para estas se designó un valor para el paso de 1, mientras que para las zonas de mayor densidad un valor de 5 y para las zonas de baja densidad un valor de 2.

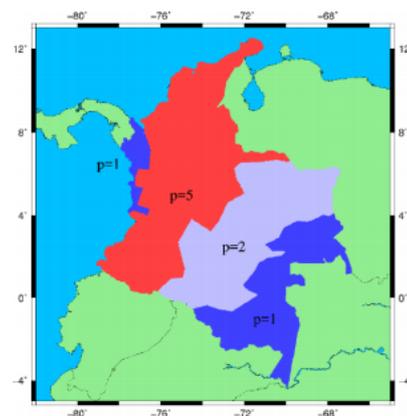


Ilustración 13 Pesos para las deformaciones de las áreas en el cálculo del factor de escala (k) óptimo.

⁸ La distorsión es negativa hacia el meridiano central y es positiva más allá de los meridianos estándar.

Sin embargo, se puede hacer una notación de que el uso de las proyecciones locales a nivel urbano tiene una distorsión mínima teniendo en cuenta la naturaleza de la misma proyección cartográfica y la altitud que es aplicada, por lo que los resultados en cuanto a mediciones en los planos locales discrepan con los productos que se obtengan del Origen Nacional. Para que no se presente la discrepancia en el uso de los datos, en el proceso de integración de la cartografía nacional los planos anteriormente mencionados deben llegar a un proceso de conversión con la vigente proyección.

Para efectos de integración a cartografía de orden nacional dichos planos se convertirían a la nueva proyección, como se regulariza en la Resolución 529 de junio 5 de 2020 que expone que “La proyección cartográfica aplica principalmente para el intercambio, uso y gestión de la información geográfica del país”. Lo anterior no restringe el uso de otras proyecciones para levantamientos, mediciones o proyectos-actividades de geoposicionamiento a que haya lugar, para los cuales se aplicarán los parámetros de conversión correspondientes” (Lopez Morales, O. L., 2020)

Según Jairo Vargas, “La propuesta del nuevo origen nacional utiliza una proyección secante, esto se realiza para áreas extensas, pero genera deformaciones mayores fuera de los puntos de tangencia, y dentro de los puntos (B) deformaciones negativas, este tipo de proyecciones se utilizan para representaciones en escalas pequeñas y están orientadas al mapeo, nunca para fines transaccionales o en ingeniería, su aplicación para Catastro multipropósito no es viable, menos en un territorio con la topografía de Colombia” (Vargas Jairo, 2021)

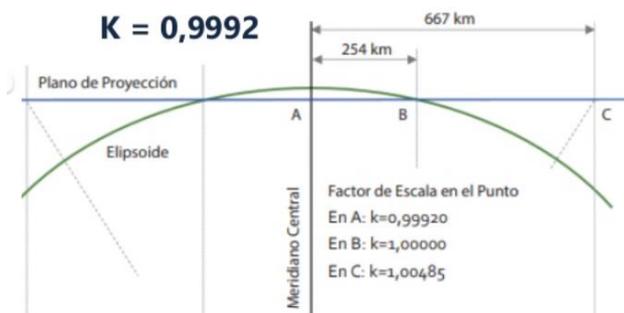


Ilustración 14 Proyección secante y factor de escala.

Aunque no parezca relevante la distorsión en área es abrupta con el nuevo sistema, en unidades grandes como las hectáreas Ha, no se identifican las deformaciones fácilmente, pero en el momento de presentarse los valores en unidades de metros cuadrados m², donde se manifiesta

realmente la pérdida de superficie verdadera. Por lo que es más factible por tanto que se presente mayor confiabilidad para el uso del antiguo sistema de proyección con los seis orígenes como con los planos locales. Evocando por tanto que la proyección secante (dos puntos de contacto con el elipsoide (Este-Oeste) tiene un comportamiento de onda, quiere decir que, en sentido Norte-Sur sobre el origen, las deformaciones son menores, pero sobre el meridiano del origen se incrementan. CTM12 presenta puntos de tangencia donde las mediciones se conservan y presentan de manera estable más sin embargo fuera de estos puntos este caso no sucede.

Claramente la implementación del nuevo sistema trae consigo ciertas repercusiones dentro del marco de desarrollo e infraestructura del país, trayendo implicaciones en varios aspectos sociales, económicos y políticos, que a mediano o largo plazo tendrán un impacto que afectara en múltiples sectores progresistas. Por lo que se exponen algunos de ellos que tienen una amplia participación en la zona de estudio.

2.5 Componente ambiental

En Colombia la autoridad encargada de llevar una gestión y control de los procesos de proyectos civiles es la Autoridad Nacional de Licencia Ambientales - ANLA, para llevar a cabo cada su trabajo institucional se apoyan con instrumentos, permisos y trámites ambientales. Una ayuda en su labor son los Sistemas de Información Geográfica - SIG, “herramienta que le permitirá satisfacer sus necesidades de información a nivel interno y externo, dando soporte a las diferentes instituciones nacionales que conforman el Sistema de Información Nacional Ambiental - SINA, bajo estándares establecidos por la Infraestructura Colombiana de Datos Espaciales – ICDE”⁹.

Con el Único Origen de Coordenadas se estableció por tanto las condiciones básicas de cartografía con parámetros definidos en la Resolución 471 del 14 de mayo de 2020 y la posterior Resolución 529 del 05 de junio, emitidas por el IGAC. Por lo que los proyectos, obras o actividades, sujetos al licenciamiento ambiental deben ajustarse a lo establecido por lo que la información geográfica debe replantearse con los lineamientos de la normatividad, con lo que se llevan seguimiento para la evaluación de los estudios ambientales y de cumplimiento ambiental. Fue hasta el 31 de diciembre de 2020, el usuario tuvo libertad en presentar información geográfica cumpliendo con la proyección cartográfica Origen Nacional, dispuso en el sitio Web de la ANLA el modelo de almacenamiento

⁹ <http://portal.anla.gov.co/sistema-informacion-geografica>

geográfico acorde con la Resolución 2181 de 2016 en la proyección mencionada; cabe aclarar que se mantienen los modelos de almacenamiento empleados dando cumplimiento a los orígenes locales conforme a la ubicación territorial de las obras.

En consecuencia, de lo anterior, la cartografía básica o temática que se genere en cada uno de los estudios o informes debe por tanto usar la proyección cartográfica nueva dando cumplimiento a las medidas internas de ejecución de los proyectos, obras y actividades. Es primordial que se presente un manejo y una migración de los datos de cada proyecto a la nueva proyección (esto como factor tardío ya que toca hacer la conversión de coordenadas en cada una de las bases de datos existentes),

Es necesario por tanto un control completo por parte de las entidades para que a futuro no se presenten contradicciones con la parte física del medio y los proyectos en desarrollo, cumpliendo no solo en la parte jurídica sino en la parte ambiental.

Catastro multipropósito

El catastro es un sistema de información que registra datos actualizados de la tierra de predios formales e informales. En la Resolución 0070 del 4 de febrero de 2011 donde se reglamenta la formación catastral, la actualización de la formación y la conservación catastrales, definiendo en su artículo 1 el catastro como el inventario, debidamente actualizado de los bienes inmuebles haciendo la identificación física, jurídica, fiscal y económica (Instituto Geográfico Agustín Codazzi, 2011).

En esta instancia, se sabe que el catastro multipropósito es la herramienta la cual permite “la administración, gestión y gobernanza de las tierras rurales, partiendo desde la disposición y conocimiento de la situación de los predios en la actualidad como de sus propietarios”¹⁰. La justificación principal de la nueva proyección es para el fortalecimiento en la administración de tierras en el país, buscando por tanto suplir las necesidades dentro de las actividades de lo que se conoce como el nuevo Catastro Multipropósito, enfocándose al levantamiento predial planimétrico y la fácil gestión de los datos espaciales. Lo cual es incoherente considerando que el propósito de los trabajos planimétrico se basa en la precisión y nivel de detalle de la superficie por lo que es complejo el manejo de los datos debido a que con esta proyección se presentan disminuciones en las áreas lo que dificulta por tanto tener un registro correcto de la información que se almacena sin

¹⁰ Escalante, N. (05 de Julio de 2015). IGAC - Instituto Geográfico Agustín Codazzi.

embargo el propósito es la unificación de los datos que permitan la funcionalidad de los mismos en entidades e instituciones del país.

El catastro multipropósito incluye más variables que no se contemplaban con el catastro tradicional y en el país se plantea con la identificación de propietarios, poseedores, arrendatarios y ocupantes, guardando datos sobre linderos, forma del predio, ubicación, entre otras posicionándose entonces como una herramienta para el ordenamiento territorial, el manejo de las inversiones municipales y la planificación de los procesos de gestión del riesgo. Básicamente, la finalidad es la organización de territorio, tomando lo anterior como una ayuda para tomar decisiones volviéndose un elemento de transformación para el territorio y por tanto la integración de la información con otros sistemas.

Según José Agustín Wilches Gómez, “La nueva proyección CTM12 generará sin duda incertidumbre y complicaciones a la Superintendencia de Notariado y Registro (SNR) y a los Gestores Catastrales al momento de certificar la cabida y lindero de los predios, por no corresponder la conversión de las coordenadas de la nueva proyección con las distancias, ángulos y área al describir la REALIDAD FÍSICA predial, en razón a que la nueva proyección CTM12 tiene como propósito la visualización continua predial sobre un mapa, más no refleja las verdaderas distancias, ángulos y área de los predios”¹¹ (Wilches G. J., 2020).

2.6 Agencia Nacional de Tierras:

El ordenamiento social de la propiedad es una meta del gobierno donde se ejecuten políticas integrales, el Decreto 2363 de 2015 crea la Agencia Nacional de tierras – ANT con el objeto de “ejecutar la política de ordenamiento social de la propiedad rural formulada por el Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, para lo cual deberá gestionar el acceso a la tierra como factor productivo, lograr la seguridad jurídica sobre ésta, promover su uso en cumplimiento de la función social de la propiedad y administrar y disponer de los predios rurales de propiedad de la Nación” (Funcion Publica, 2015).

Las funciones de la ANT se relacionan con toda la parte de ordenación del territorio, desde las políticas de ordenamiento por el Ministerio de Agricultura, la articulación de acciones con autoridades catastrales como la Superintendencia de notariado y Registro, las dinámicas de mercado inmobiliario en la parte rural, la identificación

¹¹ Wilches, G. J. (2020). Origen Carográfico CTM12.

física y jurídica de las tierras para la construcción del catastro multipropósito, entre otros. En este caso se enfatiza que los levantamientos de predios que se realicen deben seguir la metodología propuesta del catastro multipropósito, quiere decir que la tarea en general de la agencia es administrar, gestionar y llevar un control sobre el manejo del territorio, formalizando y legalizando los procesos de obtención de propiedad de la tierra; se encarga de múltiples procesos donde se maneja información espacial de los linderos y predios del país por lo que la implementación de la nueva proyección básicamente es un desafío en cuanto a la actualización e integración de la información de todas las entidades participantes de la administración del territorio y más en el suelo rural donde una extensión amplia del territorio es de solo algunos y el restantes de muy pocos.

2.7 Restitución de tierras

Es un tema bastante importante en nuestro país debido a que por el conflicto armado y otros factores que donde hay despojo del territorio de individuos, por lo que se han presentado programas para hacer frente a este problema. La restitución de tierras por tanto es un derecho que tienen las víctimas a que se les devuelva su predio cuando el mismo fue despojado o abandonado causado por el conflicto armado de grupos; dentro de este tema se plantea por tanto si esta restitución se da con un título de propiedad o no, con la ley de Víctimas busca la devolución de la tierra no solamente con un título de propiedad sino también con condiciones socioeconómicas. En los municipios trabajados, se presenta un alto porcentaje de población donde se da el desplazamiento forzado con fines de despojo de tierras, debido a que han sido altamente afectados por el conflicto armado por lo que es importante atender las necesidades del grupo poblacional. Como se ha mencionado anteriormente es necesario que exista una gestión de los datos del territorio y en este caso se trabaja con información de predios, linderos y títulos de propiedad donde es indispensable que exista un factor de transparencia cuando se efectúa el debido proceso de restitución; trabajar la nueva proyección planteada por el gobierno se torna complejo ya que el proceso de restitución es dispendioso porque se presentarían ciertos vacíos operacionales en la parte física y en la parte jurídica de los linderos causando retrasos en la actualización de la información teniendo en cuenta que los avances con respecto al tema son pocos por parte del Estado, poniendo el caso de que aun con la proyección de los seis orígenes anteriores los inconvenientes persistían para hacer una propia entrega legal del terreno.

2.8 Gestión del riesgo

En el país el tema es bastante importante por lo que se han diseñado programas de prevención y mitigación para los diferentes fenómenos que pongan en riesgo la integridad de las personas, con el fin de reducir la probabilidad de desastres donde los más vulnerables se vean afectados. La información es muy valiosa para generar herramientas para el manejo del riesgo por lo que es indispensable que se haga de manera correcta teniendo en cuenta que se presentaran esfuerzos en trabajo, tiempo y costos debido a la migración de todos los datos cartográficos presentados con la antigua proyección de Gauss. Según la normatividad de la Resolución 471, los trabajos cartográficos deben cumplir con una exactitud en los atributos cualitativos y cuantitativos mostrado con la nueva proyección sin embargo esto no se tomaría para todo el territorio debido a que la misma deja de lado lo conocido como la plataforma continental y el mar territorial incluyendo todas sus islas, donde la justificación se queda corta por los límites de cobertura por parte la proyección y sus parámetros. En la parte norte del país esto tendría ciertas implicaciones en el desarrollo de mapas de riesgo vulnerabilidad y amenaza teniendo en cuenta que la distorsión en las magnitudes en alta en comparación con la antigua proyección de los seis orígenes por lo que también se debe plantear una relación con el nuevo y el anterior para establecer una comparación entre los nuevos trabajos con los nuevos que se generen a partir de CTM12 en el ámbito de la gestión del riesgo.

Los lineamientos en la gestión del riesgo de los municipios se focalizan principalmente en los fenómenos que en esta zona del país son incrementados por el cambio climático, uno es la temporada seca y el otro extremo la temporada lluviosa, ambos con caracterizados por afectar mayormente el sector ganadero y agrícola. Con la implementación de la nueva proyección el objeto principal es no perder los históricos cartográficos en la actualización de la información ya que son conocimientos básicos que permiten la elaboración de estrategias en los municipios.

2.9 Normativa

Las propuestas planteadas de regularización para el trabajo de información desde hace varios años se enfocan en generar la sistematización de la administración de tierras en el país integrando las partes técnicas y metodológicas de la representación de la información como su registro. La finalidad es básicamente contribuir en la construcción del catastro multipropósito, donde existan relaciones entre la parte física de la propiedad con el registro de los mismos como predios, por lo que es necesario unificar toda la

información técnica espacial de los sectores prediales para que se ajuste de manera jurídica la información, siendo esta transparente y verídica para llevar a cabo acciones de tipo civil y legal.

Toda la información cartográfica tiene que ser de fácil acceso y debe estar disponible para el beneficio de cada uno de las entidades que utilicen los datos para el fortalecimiento del desarrollo y ordenamiento de un territorio.

Prácticamente todos los trabajos y proyectos se deben presentar con la nueva proyección cartográfica para Colombia dado a la Resolución vigente, aunque no se hace una restricción en cuanto al uso de otras proyecciones para levantamientos, mediciones, proyectos o actividades de posicionamiento a que haya lugar, para los cuales se aplicaran los parámetros de conversión correspondientes (Lopez Morales, O. L., 2020) y en la normativa de la Resolución 471 en el Artículo 5 Especificaciones técnicas por producto se menciona que para la recolección de datos se admite una metodología distinta a la propuesta teniendo en cuenta que se cumpla con los indicado en la misma, por cuestiones de precisión se recurre a seguir los lineamientos técnicos expuestos en la Resolución 643 de 2018 donde se hace la adopción de “las especificaciones técnicas de levantamiento planimétrico para las actividades de barrido predial masivo y las especificaciones técnicas del levantamiento topográfico para casos puntuales” (*Instituto Geográfico Agustín Codazzi, 2018*). Por lo que distintas asociaciones han recurrido al manejo de sus datos con planas locales o con la antigua proyección de Gauss.

En la resolución 643 de 2018, en el apartado 7 se especifica el sistema de referencia que se deben implementar en levantamientos topográficos, refiriéndose al datum MAGNA-SIRGAS para Colombia establecido por el IGAC. En este caso los levantamientos se ligan a las coordenadas de las estaciones de red pasiva del IGAC y los puntos topográficos deben estar dado en coordenadas geográficas, coordenadas Gauss-Krüger y coordenadas cartesianas locales donde se indique el origen plano cartesiano especificando que si el lindero o predio puesto a levantar se encuentra a una distancia mayor de 20 kilómetros del origen certificado por el IGAC, se debe generar un origen específico para dicho levantamiento topográfico con parámetros de creación. Teniendo en cuenta lo anterior se genera un conflicto de relación de información por la nueva proyección porque básicamente se puede presentar un cruce de información e inconsistencias, probablemente no en información oficial que se está actualizando sin embargo si en la que se genere por fuera de la entidad responsable de los trabajos

cartográficos en este caso el IGAC y las entidades oficiales. Es importante que se lleve un control completo en la parte técnica por las magnitudes en áreas y distancias porque el trabajo en campo tendría bastantes diferencias con la creación de información cartográfica con la nueva proyección Origen Único Nacional.

3. Generalidades

Derivado de la complejidad y de los altos costos tanto de productos de información, que son obtenidos mediante procesos complejos como la teledetección, software especializado para la manipulación de información geográfica, es posible la aplicación de tecnologías emergentes y aplicaciones de uso libre, que permita realizar estudios de terrenos mediante recorridos a pie utilizando un dispositivo móvil como pudiera ser un teléfono o una tableta, para generar una serie de productos de utilidad para los usuarios especializados, Demostrando así la capacidad de los sistemas de información y de las nuevas plataformas de cómputo, de soportar aplicaciones interdisciplinarias que se conviertan en soluciones para problemáticas específicas orientadas a usuarios involucrados en las disciplinas.

El ecuador es el origen para medir la latitud, que es la distancia angular que existe entre el ecuador y el punto a lo largo del meridiano, la latitud se mide de 0 a 90 grados en dirección norte o sur, siendo el ecuador la latitud 0°. Mientras que el meridiano de Greenwich es el origen para medir la longitud, que es la distancia angular medida sobre el ecuador entre el meridiano de referencia y el punto, esta se mide de 0 a 180 grados en dirección este u oeste, siendo el meridiano de Greenwich la longitud 0°. (Albornoz, M. C., 1838)

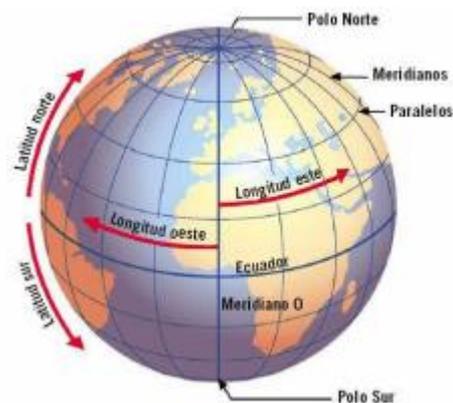


Ilustración 15 paralelos y meridianos

Un levantamiento topográfico es un estudio que permite obtener un modelo que representa las características de un terreno. El proceso final tiene como resultado el poder representar el terreno mediante, planos, mapas, gráficas, curvas de nivel, modelos 3D, etc... (Cuartero Sáez, A., 2017)

Para ubicar la posición de los puntos de estudio se utilizan coordenadas de latitud, longitud y cota. Para la realización de un levantamiento topográfico se utilizan diversas herramientas e instrumentos, como pueden ser el teodolito o la estación total, equipos que requieren de dos o más personas para operarse de manera apropiada.

En este trabajo únicamente se utilizó como herramienta un equipo portátil de tipo Teléfono Inteligente que cuente con almacenamiento interno disponible y una estación total para poder realizar las tareas relacionadas con el levantamiento topográfico, principalmente la captura de linderos y asociarlas a puntos sobre la tierra, Y como resultado del análisis se obtendrán las áreas y los perímetros de un predio, esto para proporcionar información confiable y de calidad aceptable.

En la actualidad el uso de dispositivos móviles tales como teléfonos inteligentes y tabletas, ha tenido un aumento considerable, abriendo así la posibilidad de ampliar el uso y aplicación de este tipo de equipos a múltiples áreas de trabajo. Tanto así que, se llegó a la cifra de 60,78 millones de líneas en 2018, De este total, 20,52% corresponden a la categoría pos-pago y 79,48% a prepago. Para esta fecha Por cada colombiano hay 1,2 líneas móviles en el país, (Diario la Republica, 2018)

Una ventaja adicional a la gran penetración que han tenido en la población mundial en estos equipos es también el hardware avanzado que poseen, muchas veces la capacidad de procesamiento de un teléfono inteligente, este es tan cercana como la de un equipo de cómputo habitual. Existen múltiples compañías fabricantes de equipos móviles, ya sean teléfonos inteligentes o tabletas, pero el software que estos dispositivos utilizan está fuertemente dominado por dos sistemas operativos, que son: Android y iOS.

La cantidad de sensores que los equipos de las gamas altas de cada compañía incluyen abren aún más la posibilidad de su uso y aplicación, siendo uno de los sensores más comunes y utilizados el sensor GPS, el cual permite calcular la ubicación geográfica del dispositivo.

Según datos publicados por la Agencia de Marketing Digital Branch, para el periodo 2020-2021 los porcentajes

de uso de cada una de las plataformas en Colombia muestran un dominio fuerte del sistema Android:



Ilustración 16 sistemas operativos en Colombia (Branch Agencia)

El Sistema GPS, fue desarrollado por el Departamento de Defensa de los Estados Unidos. El sistema hace uso de 36 satélites que giran en órbita alrededor de la tierra a una altura de 20,200 km para obtener las lecturas de coordenadas necesarias para establecer la posición de un objeto sobre la Tierra. Normalmente la precisión de este sistema de posicionamiento es de varios metros, aunque se puede lograr una mayor precisión en centímetros mediante otro tipo de sistemas.

Los GPS trabajan en el sistema de coordenadas geográficas WGS84 (World Geodesic System 84) Sistema Geodésico Mundial 84, que es un estándar mundial y tiene un error de cálculo menor a 2 cm. (Huerta, E., Mangiaterra, A., & Noguera, G., 2005)

Para obtener la posición, el equipo receptor debe localizar por lo menos cuatro satélites de la red, de los que obtiene la hora del reloj de cada uno de ellos, con estos datos, el aparato calcula el tiempo que tarda en recibir las señales y realiza la medición de la distancia al satélite. Este proceso se llama triangulación.

NOMBRE	SISTEMA OPERATIVO	CAPTURA	MEDICIONES	CURVAS DE NIVEL	PERFILES	MDT	EXPORTA/IMPORTA
TOPOGRAFIA APP	ANDROID	X	X				X
GPS FIELDS AREA MEASURE	ANDROID	X	X				
MOBILE TOPOGRAPHER FREE	ANDROID	X	X				X
TOTAL STATION TOPO SURVEY	ANDROID	X	X				X
ELEVATION PROFILE	ANDROID				X		
DROID TOPOGRAPY	ANDROID	X		X		X	
TCPGPS	IOS	X	X				
PLANIMETER	IOS	X	X				X
UTM GEO MAP	ANDROID	X	X	X	X	X	X

El GPS es el sistema de posicionamiento global más utilizado y con el funcionan la mayoría de los dispositivos de geolocalización, estos equipos proporcionan una precisión que va de los 15 a los 3 metros, la mayoría de los sensores devuelven varios valores de la ubicación, como latitud, longitud, altitud y orientación. La unión soviética también construyó un sistema de este tipo llamado GLONASS en 1982 que ahora es administrado por la

Federación Rusa, el cual cuenta con 24 satélites y tiene una precisión de hasta 6 metros.

	GPS	GLONASS	GNSS
	Estados Unidos	Rusia	Unión Europea
<i>País</i>			
<i>Satélites</i>	24	24	30
<i>Altura orbita</i>	20,200 km	19,100 km	23,222 km
<i>Precisión</i>	3-15 m	6 m	1 m
<i>Lanzamiento</i>	1978	1982	2005

Ilustración 17 sistema de posicionamiento existente (edu.mx2019).

La unión europea también cuenta con su propio sistema de navegación denominado Galileo o Sistema Global de Navegación por Satélite GNSS, lanzado en 2005, siendo este último hasta 5 veces más preciso que el GPS. (Huerta, E., Mangiaterra, A., & Noguera, G., 2005).

Hoy día existen diversos equipos receptores que varían según su precisión, estas pueden ser: 1 a 5 metros y Sub métrico, cabe mencionar que todos tendrán esta precisión después del pos proceso, esto quiere decir que la precisión que alcanzarán será después de bajar los datos tomados en campo y procesados con los datos de una base GPS. (Huerta, E., Mangiaterra, A., & Noguera, G., 2005)

SISTEMA	DESARROLLADOR	PRECISIÓN.
GPS	Estados Unidos	3 m.
DGPS	Estados Unidos	10 cm.
GLONASS	Rusia	6 m.
Galileo	Unión Europea	1 m.
COMPASS	China	Menor a 10 m.

Ilustración 19 sistema de posicionamiento global (edu.mx2019)

Buscando en la tienda de aplicaciones de Android, Google Play, se encuentran un conjunto de aplicaciones que permiten realizar tareas similares a la propuesta en este trabajo, la mayoría solamente realizan la recolección de datos y otras pueden ser utilizadas con las estaciones totales, siendo importante mencionar que algunas de ellas son aplicaciones con costo y ofrecen una versión gratuita, pero con funcionalidad limitada. A continuación, se enlistan algunos de los principales productos encontrados en las tiendas de las dos principales plataformas y una comparación de sus características.

UTM GEO MAP, es la aplicación que se utiliza en este trabajo, la cual cumple con todos los puntos marcados en la tabla anterior.

En el aspecto topográfico, las tecnologías de percepción remota, el uso de sensores de alta precisión y la aplicación

de herramientas de software especializado permiten obtener resultados altamente precisos, pero que requieren de grandes volúmenes de datos, grandes capacidades de procesamiento y de equipos de alto rendimiento para su correcta visualización.

Tomando como base los conceptos anteriormente expuestos, el sistema móvil que se trabaja dentro de este trabajo de investigación, deberá implementarlos de manera efectiva para ser capaz de trabajar con el sensor GPS, obtener las coordenadas de la ubicación del usuario, generar los productos propuestos, todo esto utilizando un dispositivo móvil de características discretas.

Otros estudios similares a este utilizaron once estaciones distribuidas por todo el campus principal de la Universidad Ahmadu Bello en Nigeria. El estudio abordó un Garmin Map76s y siete aplicaciones para teléfonos inteligentes (MY GPS LOCATION, MOBILE TOPO, GPS DATA, GOLOCATION, MAP COORDINATE, SUPER GEO GPS y UTM GEOMAP). Siendo el Garmin Map76S el mejor, con un valor RMSE de menos de 0,3 m en los componentes este y norte. UTM GEOMAP dio el mejor resultado entre las siete aplicaciones de teléfonos inteligentes con un valor RMSE de 0,3 m tanto en este como en norte. La aplicación de registro GNSS utilizada en un Samsung Galaxy S9+ se trató posteriormente por separado y se comparó su rendimiento con el de la observación Hi-Target V30. La aplicación funcionó bien en la mayoría de las estaciones, pero mostró menos precisión en la observación de Hi-Target V30, pero presumiblemente mejor que las otras aplicaciones de posicionamiento. (Lukman, Abdulmumin & Isiye, Olalekan & Swafiyudeen, Bawa & Muhammed, Ahmed., 2020)

Tabla 3 aplicaciones para teléfonos móviles y sus características.

por la cual se adoptan las especificaciones técnicas de levantamiento planimétrico para las actividades de barrido predial masivo y las especificaciones técnicas del levantamiento topográfico para casos puntuales (Instituto Geográfico Agustín Codazzi , 2018)

Ámbito	CE 95%	RMSEx/RMSEy
Urbano	0,52m	0,21m
Rural	5,2m	2,12m

Ilustración 20 RESOLUCIÓN 643 DE 2018

Cabe resaltar que solo sería aplicable en la zona rural del país, dado que el RMSE no permitiría su uso en zonas urbanas, Esto limita la aplicación de este a la realización de estudios de baja precisión, los cuales pueden servir como insumo de anteproyectos, estudios preliminares o de reconocimiento de zonas de interés. cabe resaltar que, con los avances tecnológicos, se podrían implementar en un futuro.

4. Metodología

El trabajo se dividió en tres partes, la primera, realizando un levantamiento topográfico de un predio ubicado en el municipio de Villapinzón – Cundinamarca, donde su base de amarre ya estaba georreferenciada previamente al sistema de coordenadas único de Colombia, la segunda parte, fue un levantamiento con un dispositivo móvil inteligente, tomando coordenadas de los mismos puntos físicos del levantamiento topográfico. Estos definirán las principales diferencias en área y forma, las coordenadas halladas permiten conocer el RMSE, validando la metodología utilizada.

Cabe resaltar que el aplicativo móvil captura las coordenadas de forma geográfica decimal, UTM y MGRS, lo cual conlleva a realizar la transformación de estos datos.

Ilustración 21 RMSE DE 7 APLICACIONES DE TELEFONOS INTELIGENTES Y GARMIN MAP 76S (Lukman, Abdulmumin & Isioye, Olalekan & Swafiyudeen, Bawa & Muhammed, Ahmed., 2020).

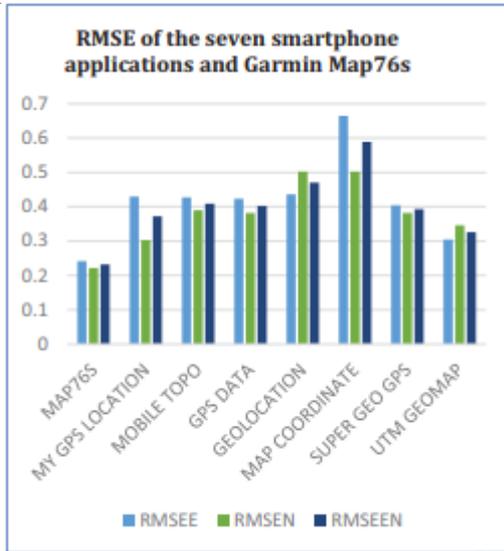


Ilustración 18 RMSE DE 7 APLICACIONES DE TELEFONOS INTELIGENTES Y GARMIN MAP 76S (Lukman, Abdulmumin & Isioye, Olalekan & Swafiyudeen, Bawa & Muhammed, Ahmed., 2020).

STATIONS	E (m)	N (m)	H (m)	E ²	N ²	RMSE _E	RMSE _N	RMSE _H	RMSE _H
GSES21	2.074	1.745	0.329	4.301	3.045	0.625	0.526	0.564	0.099
ABU2014	2.404	0.31	2.094	5.779	0.096	0.725	0.093	0.513	0.631
ABU2015	1.159	0.074	1.085	1.343	0.005	0.349	0.022	0.247	0.327
ABU2018	1.834	1.884	0.05	3.364	3.549	0.553	0.568	0.391	0.015
ABU2053	1.524	0.191	1.333	2.323	0.036	0.460	0.058	0.325	0.402
ABU2588	1.407	0.304	1.103	1.980	0.092	0.424	0.092	0.300	0.333
ABUFOUNTAIN	0.539	2.562	2.023	0.291	6.564	0.163	0.772	0.115	0.610
ABU2020	0.843	0.145	0.698	0.711	0.021	0.254	0.044	0.180	0.210
BARDA 2550	2.623	1.032	1.591	6.880	1.065	0.791	0.311	0.559	0.480
BARDA2548	1.506	1.555	0.049	2.268	2.418	0.454	0.469	0.321	0.015
ABU2011	1.64	0.531	1.109	2.690	0.282	0.494	0.160	0.350	0.334

Ilustración 19 RMSE UTILIZANDO Hi-Target V30

Tabla 4 datos obtenidos desde el aplicativo UTM GEO MAP

APPLICATIONS	E (m)	N (m)	E ²	N ²	RMSE _E	RMSE _N	RMSE _H
MAP76s	1.935	1.779	3.745	3.166	0.242	0.222	0.232
MY GPS LOCATION	3.444	2.425	11.860	5.880	0.430	0.303	0.372
MOBILE TOPO	3.417	3.119	11.673	9.731	0.427	0.390	0.409
GPS DATA	3.385	3.056	11.459	9.337	0.423	0.382	0.403
GEOLOCATION	3.485	4.013	12.146	16.108	0.436	0.502	0.470
MAP COORDINATE	5.320	4.015	28.299	16.121	0.665	0.502	0.589
SUPER GEO GPS	3.233	3.060	10.451	9.361	0.404	0.382	0.393
UTM GEOMAP	2.443	2.766	5.970	7.651	0.305	0.346	0.326

Estos datos dan un avance a la factibilidad de la aplicación de teléfonos inteligentes y tabletas en la obtención de datos geográficos, dado que la RESOLUCIÓN 643 DE 2018,

En la aplicación se da la opción de realizar conversiones de coordenadas entre los diferentes formatos disponibles, pudiendo transformar coordenadas entre las nomenclaturas de UTM, MGRS y longitud/latitud, ya sea de manera individual como en archivo, aunque al aplicativo nos presenta esta opción de conversión, se utilizó el programa magna pro 5 para este procedimiento.

Es importante realizar la conversión de coordenadas, lo anterior porque no se puede calcular áreas y distancias en coordenadas elipsoidales ya que tocaría recurrir al cálculo con trigonometría esférica, mientras que con las coordenadas planas se puede realizar el cálculo directo de la geometría. Cuando los dos levantamientos se encuentran en el mismo sistema proyectado, se obtienen los azimuts y las longitudes, es preciso obtener estos datos para poder analizar las diferencias que se dan, no solamente en área sino en dirección y longitud; se puede visualizar los vértices de los polígonos generados, y las diferencias entre los dos métodos.

El visor de UTM GEO MAP también dispone de la función de marcador de coordenadas, pudiendo incorporar una ruta y exportar la capa de coordenadas en formato KML. Y no sólo cartografía de coordenadas puntuales. Entre las funciones de localización y representación de datos podremos digitalizar entidades lineales y poligonales que también podrán ser exportadas en formatos KML e incorporar atributos descriptivos de cada elemento vectorial descrito.

En las siguientes tablas se evidencia las características de cada uno de los levantamientos topográficos y los resultados obtenidos con el desarrollo de lo descrito anteriormente, de igual forma se presenta los datos resueltos (áreas, longitudes, direcciones y coordenadas) después de haber llevado a cabo cada paso del ejercicio.

ESTACIÓN TOTAL		
	ÁREA (M2)	PERIMETRO (M)
LOTE 1	9193.0625	380.262
LOTE 2	5136	307.971
SERVIDUMBRE	467.734375	240.581

Tabla 6 áreas y perímetros

PUNTO	ESTE	NORTE	AZIMUT			DIST
			°	'	''	
10	4936112.049	2141576.765				
12	4936127.155	2141579.468	79	51	18.408	15.346
13	4936130.668	2141570.329	158	58	24.286	9.791
14	4936135.996	2141558.015	156	36	10.492	13.417
15	4936139.911	2141548.978	156	34	36.563	9.849
16	4936143.291	2141540.210	158	55	7.367	9.397
17	4936147.735	2141529.419	157	37	0.939	11.670
18	4936151.023	2141519.579	161	31	23.296	10.375
19	4936153.851	2141511.958	159	38	28.038	8.129
21	4936160.253	2141497.278	156	26	16.129	16.015
22	4936150.664	2141494.302	252	45	28.716	10.040
23	4936141.001	2141491.186	252	7	37.898	10.153
24	4936128.510	2141487.401	253	8	32.056	13.052
25	4936116.323	2141483.678	253	0	45.506	12.743
26	4936104.139	2141479.847	252	32	43.270	12.772
27	4936089.599	2141475.989	255	8	23.038	15.043
28	4936077.257	2141472.922	256	2	40.619	12.717
29	4936069.933	2141471.388	258	10	13.780	7.483
30	4936060.474	2141472.168	274	42	50.437	9.491
31	4936058.687	2141477.875	342	36	48.230	5.980
80	4936050.763	2141505.444	343	57	50.630	28.685
79	4936047.200	2141516.217	341	41	57.051	11.347
78	4936045.013	2141523.659	343	37	24.175	7.757
77	4936039.226	2141544.269	344	18	57.601	21.407
74	4936035.778	2141562.629	349	21	49.553	18.681
73	4936048.695	2141569.063	63	31	19.035	14.431
5	4936063.749	2141568.605	91	44	33.426	15.061
72	4936068.449	2141569.615	77	52	19.005	4.807
9	4936100.570	2141572.049	85	39	59.897	32.213
10	4936112.049	2141576.765	67	39	55.148	12.410

Tabla 7 datos obtenidos con estación total

MOVIL INTELIGENTE		
	ÁREA (M2)	PERIMETRO (M)
LOTE 1	9060.406	388.706
LOTE 2	5319.875	314.175
SERVIDUMBRE	546.359	546.359

Tabla 8 áreas y perímetros

PUNTO	ESTE	NORTE	AZIMUT			DIST
			°	'	''	
8	4936111.260	2141577.386				
10	4936126.899	2141581.983	73	37	10.503	16.301
11	4936130.008	2141570.876	164	21	44.445	11.534
12	4936134.045	2141558.514	161	54	53.135	13.004
13	4936138.531	2141550.209	151	37	26.437	9.439
14	4936140.194	2141541.428	169	16	33.531	8.937
15	4936142.153	2141531.908	168	22	19.703	9.719
16	4936148.976	2141520.539	149	1	49.133	13.259
17	4936153.127	2141511.534	155	15	6.836	9.916
19	4936159.615	2141499.280	152	6	2.091	13.866
20	4936149.103	2141496.781	256	37	38.638	10.805
21	4936139.775	2141490.666	236	45	10.900	11.154
22	4936129.300	2141487.835	254	52	35.062	10.851
23	4936115.630	2141484.822	257	34	12.703	13.998
24	4936102.405	2141479.891	249	33	6.502	14.114
25	4936088.771	2141475.219	251	5	5.319	14.412
26	4936075.028	2141473.239	261	48	5.831	13.885
27	4936068.602	2141471.327	253	25	48.316	6.704
28	4936055.012	2141474.439	282	53	52.422	13.942
29	4936059.882	2141479.525	43	45	25.692	7.042
68	4936047.615	2141506.651	335	39	59.130	29.771
67	4936045.874	2141512.408	343	10	26.129	6.014
66	4936042.841	2141525.064	346	31	23.787	13.014
64	4936038.887	2141546.280	349	26	34.694	21.581
61	4936035.782	2141562.146	348	55	37.472	16.167
2	4936049.344	2141569.328	62	5	44.669	15.346
3	4936062.750	2141569.020	91	18	58.057	13.410
5	4936067.168	2141567.614	107	39	12.009	4.636
7	4936099.370	2141570.978	84	2	10.305	32.377
8	4936111.260	2141577.386	61	40	40.742	13.507

Tabla 9 datos obtenidos con dispositivo móvil.

Con estos datos se procederá a realizar los análisis planteados en este trabajo.

5. Resultados

En este trabajo de estudio se verificará las deformaciones generadas, estos datos muestran que el dispositivo móvil, el cual es un dispositivo de uso general y gama media, se acerca a los resultados obtenidos con las mediciones realizadas con la estación topográfica. Las diferencias que se presentan en resultados se deben a la capacidad propia de los sensores GPS utilizados en los dispositivos móviles.

Llevando a cabo el proceso de comparación, se determinó que, para este trabajo, se presentan dos casos, ambos debidos al área del levantamiento, dado que para extensiones menores a 5000 M2, el área se verá ampliada, en comparación con el levantamiento topográfico; excediendo esta medida, este será menor que la medida de patrón.

En la siguiente tabla se puede identificar los valores de área y porcentaje calculados, denotando que la variación en áreas con ambos procesos de recolección de datos.

ÁREA				
TIPO DE LEVANTAMIENTO	DATOS MEDIDOS (M2)		DIFERENCIA (M2)	DIFERENCIA (%)
ESTACIÓN	AREA LOTE 1	9193.063	132.656	1.443%
MOVIL CELULAR	AREA LOTE 1	9060.406		
ESTACIÓN	AREA LOTE 2	5136.000	-183.875	-3.580%
MOVIL CELULAR	AREA LOTE 2	5319.875		
ESTACIÓN	AREA SERVIDUMBRE	467.734	-78.625	-16.810%
MOVIL CELULAR	AREA SERVIDUMBRE	546.359		

Tabla 5 análisis en la deformación de áreas.

De igual manera se presentan los valores que se obtuvieron en cuanto al perímetro en unidades de metros como se observa en la siguiente tabla

PERÍMETRO				
TIPO DE LEVANTAMIENTO	DATOS MEDIDOS (M)		DIFERENCIA (M)	DIFERENCIA (%)
ESTACIÓN	PERÍMETRO LOTE 1	380.262	-8.444	-2.221%
MOVIL CELULAR	PERÍMETRO LOTE 1	388.706		
ESTACIÓN	PERÍMETRO LOTE 2	307.971	-6.204	-2.014%
MOVIL CELULAR	PERÍMETRO LOTE	314.175		
ESTACIÓN	PERÍMETRO SERVIDUMBRE	240.581	7.473	3.106%
MOVIL CELULAR	PERÍMETRO SERVIDUMBRE	233.108		

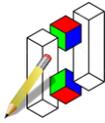
Tabla 6 análisis en la deformación de perímetros.

En esta tabla se hace evidente que la medida perimetral en todos los casos es mayor a la medida de patrón

Estas variaciones pueden deberse a la suma de varios factores, tales como, el ruido en la señal que capta el dispositivo, el receptor GPS del mismo y los obstáculos de la zona, este trabajo se situó en zona montañosa, pudiendo generar un efecto de multi-camino en la señal recibida, aunque en contraste, hay maneras de mejorar la precisión que este recibe, los dispositivos móviles pueden mejorar la precisión y ubicación de un punto conectándose a redes wi-fi, u otorgando permisos especiales de ubicación al dispositivo, también dependerá del dispositivo, dado que estos pueden presentar magnetómetros y giróscopos que mejoran la precisión de estos dispositivos.

Por esto es necesario el concepto de exactitud, esto requiere que se conozca la posición real del punto bajo evaluación. La exactitud en posicionamiento puede estimarse como un error horizontal o como un error radial. Ambos valores podrán ser diferentes

El error horizontal se determina restando los valores obtenidos para "norte" y "este" de los respectivos valores de evaluación.



ESTE		NORTE	
ESTACIÓN	MOVIL	ESTACIÓN	MOVIL
4936127.155	4936126.899	2141579.468	2141581.983
4936130.668	4936130.008	2141570.329	2141570.876
4936135.996	4936134.045	2141558.015	2141558.514
4936139.911	4936138.531	2141548.978	2141550.209
4936143.291	4936140.194	2141540.210	2141541.428
4936147.735	4936142.153	2141529.419	2141531.908
4936151.023	4936148.976	2141519.579	2141520.539
4936153.851	4936153.127	2141511.958	2141511.534
4936160.253	4936159.615	2141497.278	2141499.280
4936150.664	4936149.103	2141494.302	2141496.781
4936141.001	4936139.775	2141491.186	2141490.666
4936128.510	4936129.300	2141487.401	2141487.835
4936116.323	4936115.630	2141483.678	2141484.822
4936104.139	4936102.405	2141479.847	2141479.891
4936089.599	4936088.771	2141475.989	2141475.219
4936077.257	4936075.028	2141472.922	2141473.239
4936069.933	4936068.602	2141471.388	2141471.327
4936060.474	4936055.012	2141472.168	2141474.439
4936058.687	4936059.882	2141477.875	2141479.525
4936050.763	4936047.615	2141505.444	2141506.651
4936047.200	4936045.874	2141516.217	2141512.408
4936045.013	4936042.841	2141523.659	2141525.064
4936039.226	4936038.887	2141544.269	2141546.280
4936035.778	4936035.782	2141562.629	2141562.146
4936048.695	4936049.344	2141569.063	2141569.328
4936063.749	4936062.750	2141568.605	2141569.020
4936068.449	4936067.168	2141569.615	2141567.614
4936100.570	4936099.370	2141572.049	2141570.978
4936112.049	4936111.260	2141576.765	2141577.386
4936063.597	4936061.613	2141464.704	2141464.029
4936072.964	4936071.641	2141466.893	2141464.942
4936082.876	4936081.636	2141469.303	2141470.024
4936095.185	4936093.932	2141472.316	2141473.775
4936105.251	4936104.480	2141474.734	2141474.798
4936114.586	4936113.285	2141477.536	2141478.258
4936124.775	4936123.464	2141480.718	2141481.827
4936136.826	4936136.503	2141484.608	2141485.873
4936151.285	4936149.468	2141489.210	2141490.546
4936162.009	4936161.094	2141492.639	2141492.786
4936164.534	4936163.538	2141486.679	2141484.889
4936168.745	4936168.285	2141477.494	2141477.617
4936179.837	4936177.545	2141451.340	2141451.379
4936182.400	4936180.660	2141445.000	2141445.953
4936174.251	4936174.564	2141442.624	2141441.015
4936166.028	4936166.021	2141440.223	2141439.584
4936155.285	4936153.504	2141437.568	2141436.977
4936141.785	4936139.870	2141434.317	2141432.341
4936127.956	4936129.434	2141430.943	2141432.609
4936099.846	4936107.107	2141424.142	2141424.513
4936088.475	4936085.415	2141421.564	2141420.070
4936079.622	4936076.239	2141419.613	2141417.385
4936076.919	4936075.761	2141425.917	2141422.440
4936072.828	4936072.542	2141437.150	2141434.986
4936065.108	4936062.350	2141458.663	2141457.646

Tabla 7 determinación de errores horizontales.

Se realizó la comparación entre las ordenadas de las coordenadas de los dos métodos trabajados, esto con el fin de hallar el RMSE N, RMSE E y el error radial.

Para esto se calculó la raíz cuadrada del error medio cuadrático (REMC), el cual es la diferencia entre las ordenadas de un mismo punto, se realiza para todos los datos obtenidos en campo. Después se eleva al cuadrado cada error, obtenga el promedio y luego se extrae la raíz cuadrada

ERROR MEDIO CUADRÁTICO ESTE	ERROR MEDIO CUADRÁTICO NORTE	ERROR RADIAL
1.450	1.213	1.891

Tabla 8 RMSE Y ERROR RADIAL.

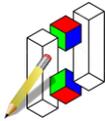
El error radial es el resultado de combinar el error de posicionamiento tanto en la dirección norte, como en dirección este. El error en posicionamiento es igual a la suma al cuadrado de los errores cuadráticos tanto en este como en norte, y a este resultado se vuelve a extraer raíz cuadrada.

Todo esto es necesario, dado que la resolución 643 del 2018 del Instituto Geográfico Agustín Codazzi indica que un punto de lindero realizado con GPS de una sola frecuencia, no necesariamente implica la no conformidad de los levantamientos planimétrico, pues estas características obedecen a situaciones presentes que limitan la identificación inequívoca, las mediciones directas o cuya localización tiene carácter transitorio por la dinámica de la zona. Para cada punto de lindero se debe garantizar la calidad posicional, realizando una medición controlada del punto a georeferenciar (sistema basado en la doble medición o mediante relaciones geométricas entre las diferentes mediciones en el levantamiento). Donde no sea posible establecer dichas relaciones geométricas, deberá realizarse doble medición independiente, así:

Identificador de la medida	CT01
Nombre de la medida	Error circular al 95% de significación
Alias de la medida	Exactitud de navegación
Nombre de la medida básica de calidad	CE95
Definición de la medida básica	Radio que describe un círculo, en el cual se sitúa la localización verdadera del punto con una probabilidad del 95%.
Tipo de valor	Númérico
Nombre del parámetro	No aplica
Definición del parámetro	No aplica

Tabla 9 error circular.(Instituto Geográfico Agustín Codazzi, 2018)

Para lo cual se deberá cumplir con el error circular denotado en la anterior ilustración.



INTERVALO DE CONFIANZA		
NIVEL DE CONFIANZA	95%	
GRADO DE LIBERTAD	53	
medicion +- 1.364	METROS	

Tabla 10 intervalo de confianza

Para notar las diferencias generadas por los métodos descritos en este trabajo, es indispensable generar los planos que demuestren las variaciones en posición y dimensión, para lo cual se usó el software AutoCAD. El cual nos permite visualizar las diferentes variaciones encontradas al procesar la información de campo.

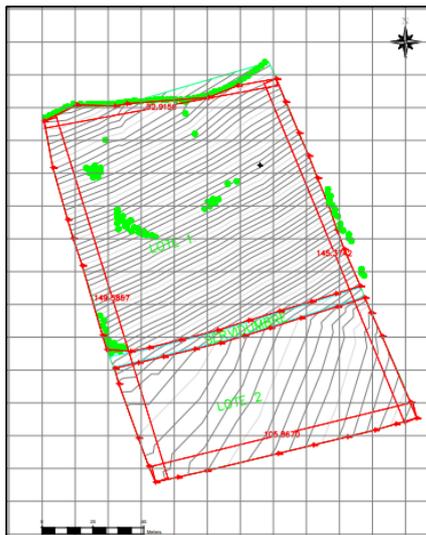


Ilustración 22 Plano final levantamiento con estación.

La primera salida grafica generada es el levantamiento topográfico realizado con la estación total, esta imagen nos permitirá tener una referencia tangible de las áreas y las formas descritas en el levantamiento topográfico, asimismo nos servirá de patrón para comparar los cálculos ya mencionados.

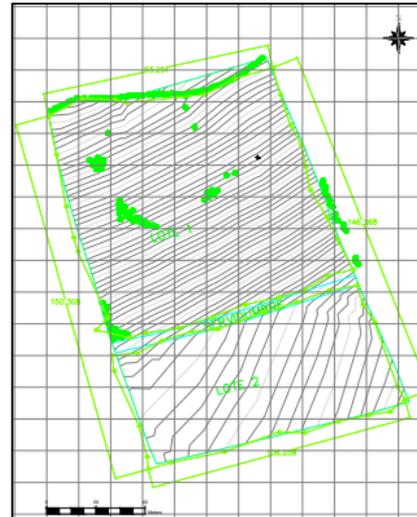


Ilustración 23 Plano final levantamiento con celular.

La segunda salida grafica corresponde al levantamiento de información a través del aplicativo UTM GEO MAP en un dispositivo móvil de características intermedias, en este se puede ver algunos cambios con respecto al mapa inicial, donde se observan diferencias generales en dimensión y forma.

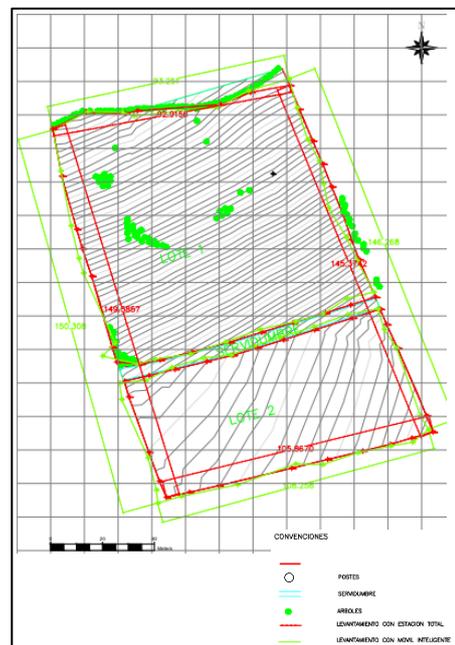


Ilustración 24 Plano final diferencia entre métodos.

La última salida grafica generada, es el comparativo de los dos métodos de recolección de información geográfica. En este se puede observar de manera intuitiva las diferencias expuestas en este documento, se pueden apreciar las variaciones en posición y forma, los desplazamientos generados por los dos tipos de metodologías, así mismo se

pueden evidenciar los cambios en las direcciones y en distancias de los puntos capturados en campo.

Estas representaciones no son las salidas gráficas definitivas dado que estas no cumplen con lo mínimo establecido para un plano topográfico, por lo tanto, los planos finales se encuentran en la carpeta de anexos del presente documento.

6. Discusión

Este procedimiento permite generar información cartográfica de utilidad para los diferentes actores sociales, dado que al procesar esta información se obtuvieron datos relevantes para la captura de información geográfica útil, sirviendo de base para diferentes proyectos de ingeniería, se puede evidenciar que la información recolectada es similar en precisión a equipos de navegación satelitales, como lo son los navegadores GNSS, esto plantea la necesidad de investigar más a fondo la aplicación de móviles inteligentes, dado su fácil manejo y rápida disposición en los mercados, para ello será necesario la indagación y desarrollo de diferentes aplicativos y dispositivos móvil que permitan mejorar su aplicación en campo, este método de captura de información geográfica con aplicaciones móviles, resultaría útil en zonas de conflicto armado, dado que estos facilitarían la recolección de información, la reducción de equipos, el gasto operativo y la logística necesaria para generar trabajos topográficos, con la facilidad de poder implementar el nuevo sistema de proyección. En las zonas rurales es común encontrar predios referenciados con coordenadas antiguas, convirtiéndose en un problema, dado que la información es obsoleta debido a los cambios en nomenclatura en los valores de coordenadas, con el agravante de que los predios pueden presentar variación en áreas debido a la tradición del inmueble, al no actualizar esta información, se pueden hallar predios con áreas y formas diferente a la de los registros públicos, esto hace necesario una rápida implementación en la actualización catastral en la zona rural del país.

El anterior sistema de referencia con sus 6 orígenes, dividían al país en 6° cada uno dejando un punto de secante a la mitad de los 6° , por lo que lo comprendido entre los puntos de secancia es donde se reduce el área y los extremos de estos puntos es donde se aumenta la misma, esto es debido al factor de escala de la proyección, donde San Andrés y Providencia son un ejemplo, desde un origen central aumentan las áreas contundentemente de las islas. Este nuevo factor de escala incide en las medidas debido a que es el que afecta la relación que se da entre mediciones y distancias; dependiendo de la altura en la que se esté

trabajando se genera un plano de proyección más arriba del mismo y se incrementa el factor de escala.

Por otro lado, en una proyección secante, las zonas que se encuentren debajo del elipsoide aumentan las distancias, mientras que dentro de este, esas distancias se vuelven cortas, lo mismo pasa con las áreas, las que están fuera del centro tendrán más área, mientras que las que se encuentran dentro se reducen, poniendo el caso de las deformaciones en área que no se podrán identificar fácilmente en la parte norte-sur y la zona central del país donde se presentarían áreas menores; en unos años esto tendrá ciertas implicaciones en las zonas rurales, generando conflictos, lo que seguramente podría llevar a realizar una estructuración del sistema actual.

La disposición de la información es fácil de manejar, esta fue procesada para obtener resultados que permitan hacer un diagnóstico conciso del presente estudio, por lo que se presentan de manera organizada los resultados con el análisis realizado. Cabe aclarar que los valores consignados son presentados en formato de Excel, dentro de los archivos anexos donde se evidencian los cálculos de cada una de las tablas para cada uno de los elementos planteados.

7. Conclusiones

Las proyecciones cartográficas permiten representar la superficie de un elipsoide, sin embargo, todas presentan un tipo de distorsión diferente dependiendo de los parámetros de proyección y la zona de la tierra, el Nuevo Único Origen para Colombia a pesar de lo anterior incrementa las deformaciones en algunas partes del país las distorsiones en magnitudes espaciales son bastante considerables en diferentes zonas con esta nueva proyección, con el fundamento de que aumentan cuando se aleja del origen. Planteándolo de esta manera, todos los proyectos de ahora en adelante presentarán inconvenientes con respecto a la información cartografía.

Las críticas y apreciaciones del cambio realizado son evidentes desde cada una de las sociedades dado que como gremio se debe poner en consideración todas las cuestiones relacionadas con las actualizaciones técnicas y las nuevas tecnologías, dando conceptos diversos ya que se da una connotación en la parte práctica, los resultados y productos que se obtengan. Son dos temas técnicos los que se deben considerar, el primero es el cambio de proyección a secante y la determinación del factor de escala.

El uso del GPS en topografía ha facilitado las tareas en el ámbito topográfico, mostrando con gran precisión la

posición en el plano horizontal a bajo costo y con poco tiempo de rastreo mediante la señal de los satélites, para generar productos geográficos y cálculos referenciales se puede utilizar una proyección tangente, en un proyecto que genere un plano para proyectos civiles, cálculos de precisión y catastro se debe utilizar un sistema de coordenadas con una proyección diferente. En el caso de las planas cartesianas donde se asume que la tierra es un plano hasta un límite (20 km) y que es utilizada para escalas mayores a 1:5000 en las partes urbanas, este puede generar una superposición de proyecciones locales y es un conflicto cuando se comparten proyectos en las entidades territoriales. El CTM12 ayuda con la intemporalidad de los datos, pero debe ser usada en cartografía temática en el ámbito nacional para llevar a cabo análisis cartográficos en sectores gubernamentales, mineros, energéticos, turísticos, entre otros, ya que no es conveniente trabajar temas catastrales porque tendría un efecto en las mediciones y temas de costos dado a las deformaciones en dimensiones que genera.

El Único Origen de Coordenadas, georreferencia los predios generando y manteniendo actualizada la información catastral, en cada uno de los aspectos económicos y jurídicos de la propiedad, permite la representación básica del territorio formando un apoyo fundamental a la planificación de este, sin embargo, no sirve para hacer ingeniería de detalle (es necesario otras proyecciones para hacer la representación detallada del territorio con fines de diseño de ingeniería), teniendo en cuenta que no todas las escalas se pueden llevar a este campo por lo que hay que jugar con algunos factores; esto trae consigo implicaciones económicas y técnicas, un ejemplo, los proyectos de gran envergadura referenciados con coordenadas antiguas convirtiéndose en un problema porque la información es obsoleta debido a los cambios en nomenclatura en los valores de coordenadas. Con el agravante de que los predios pueden presentar variación en áreas debido a la tradición del inmueble, al no actualizar esta información, se pueden hallar predios con áreas y formas diferente a la de los registros públicos, esto hace necesario una rápida implementación en la actualización catastral en la zona rural del país.

La proyección CTM12 es cilíndrica, pero tiene el efecto de una proyección azimutal porque se da en una sola zona y se da de manera secante, por más precisa que sea, siempre se presentara un componente de degradación en cuanto a áreas, formas, direcciones angulares y medidas porque no se pueden conservar todas las propiedades de una superficie elipsoidal en una superficie plana. El fin de la cartografía es representar el modelo matemático del elipsoide y las proyecciones se utilizan para obtener un alto

grado de detalle en forma de la superficie anteriormente mencionada; en cartografía no se utilizan las coordenadas cartesianas si no las geodésicas (latitud-longitud) y (N-E), las escalas pequeñas se utilizan en fases iniciales de proyectos, pero en ingeniería toca generar cartografía más detallada, es decir, a escalas más grandes.

Respecto al método de captura de información geográfica con aplicaciones móviles, resultaría útil en zonas de conflicto armado, dado que estos facilitarían la recolección de información, la reducción de equipos, el gasto operativo y la logística necesaria para generar trabajos topográficos, con la facilidad de poder implementar el nuevo sistema de proyección, Este tipo de Levantamiento se asemeja u un levantamiento realizado cinemático GPS. El cual es utilizado para levantamientos topográficos de detalle, es muy eficiente para medir gran cantidad puntos que están cerca unos de otros.

La implementación de dispositivos móviles en la topografía no es nueva, ya se han utilizado los navegadores GPS para demarcar zonas de interés, pero dado que estos dispositivos tienen un gran costo, su uso se ha disminuido con los años, esto deja un vacío el cual puede ser ocupado por los dispositivos móviles actuales, los cuales al ser de uso cotidiano presentan mejor relación costo beneficio, además estos dispositivos presentan una gran versatilidad en la vida cotidiana de los profesionales, y no es de uso exclusivo de una rama de la ingeniería, permitiendo la interdisciplinariedad a la hora de desarrollar aplicaciones de uso laboral, con el desarrollo de este trabajo se demostró la congruencia de los datos, pudiendo ser una solución para la actualización de información geográfica en la nación, pero este debe actualizar los documentos normativos en cada uno de geoportales de las entidades nacionales, en lo que respecta a funciones públicas y procesos de producción cartográfica, este se tendrá que hacerse de forma gradual.

Como estudiantes y profesionales se debe tener un punto de vista con respecto a la realidad del entorno, una posición para tomar decisiones acerca de la implementación en trabajos con el Nuevo Origen, de cuando este sea conveniente o no, por lo que se deben tener herramientas de juicio para generar productos y entregables de manera correcta, dado que no solo se crea cartografía como producto final, sino que esta se integrara en un proyecto donde se busca suplir los requerimientos de las fases del mismo.

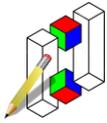
Por lo anterior es preciso definir en qué tipos de proyectos y trabajos se puede implementar CTM12 con el propósito

de optimizar los procesos, quiere decir de cuando usarla o no esta proyección. Las precisiones logradas con este método generan gran confianza en la implementación de dicha proyección, aunque este esté demostrado que afecte las áreas, es una forma práctica de actualizar la información analógica del país, mejorando su software y hardware, se podría pensar en el desplazamiento de dispositivos especializados de medición, dado que estarían en los rangos permitidos por la Nación para los levantamientos topográficos.

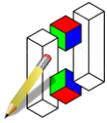
Es necesario una capacitación completa para organizar y llevar a cabo la migración de los datos, el uso de coordenadas geográficas simplifica la operación de la transformación, pero aumenta las distorsiones. El trabajo en cuestión buscaba abrir las posibilidades sobre el beneficio de la implementación del Nuevo Origen de Colombia y su reto en el catastro multipropósito, cabe resaltar que todo levantamiento topográfico tiene un grado de error, por lo que las diferentes instituciones han generado lineamientos para la entrega de trabajos topográficos donde se especifican este tipo de errores permisible, en consecuencia será necesario revisar dicha documentación para validar un trabajo realizado con los elementos expuestos, es aquí donde se da la necesidad de poder ajustar la información capturada por los diferentes equipos topográficos y específicamente por los móviles de uso cotidiano, pues de ser posible, estos serían una herramienta versátil, dado que impactarían directamente en la producción de cartografía y en los costos de producción, favoreciendo considerablemente la actualización del catastro nacional. Todos los días los procesos están en constante evolución por lo que hay que ser críticos ante estos cambios en aspectos técnicos y morales que conllevan a tener una transformación sistemática en general, tanto en el campo ingenieril como en el social, ya que todo siempre trae consecuencias positivas o negativas, por lo que está en todos buscar la excelencia en cada proceso en el país, no solo cartográfico sino en cada área de conocimiento.

• **REFERENCIAS:**

- Alborno, M. C. (1838). Tratado de topografía y agrimensura. Imprenta de Cruz González. https://books.google.com.co/books?hl=es&lr=&id=VDW7366ck0wC&oi=fnd&pg=PA1&dq=Tratado+de+topografia.+Aguilar.&ots=A6G6e0TtV&sig=_jodx_CL1mdB6Y4t9YqozOyIWbM#v=onepage&q=Tratado%20de%20topografia.%20Aguilar.&f=false
- Alvino, C. (2021, April 12). Estadísticas de la situación digital de Colombia en el 2020-2021. Branch Agencia; Branch Agencia de Marketing Digital. <https://branch.com.co/marketing-digital/estadisticas-de-la-situacion-digital-de-colombia-en-el-2020-2021/>
- ANLA. (26 de Noviembre de 2018). Resolución No. 02181. Obtenido de http://portal.anla.gov.co/sites/default/files/res_2181_26112018_ct_3716.pdf
- ANLA. (09 de Octubre de 2020). Circular Externa No. 00001. Nuevo Sistema de Proyección Cartográfica para Colombia - Origen. Bogotá D.C. Obtenido de https://www.anla.gov.co/documentos/normativa/Circulares/13-10-2020-anla-Circular_2020177205-2-000.pdf
- Castrillón, O. (23 de Septiembre de 2020). Un vistazo al nuevo sistema de coordenadas CTM12. Obtenido de <https://www.youtube.com/watch?v=eIaR2BXGgIE>
- Colección cartografía antigua. (S.F.). “Las raíces de la cartografía europea en la antigüedad griega y romana”. Recuperado de: <https://www.coleccioncartografiagm.com/index.php/informacion/item/63-las-raices-de-la-cartografia-europea-en-la-antigüedad-griega-y-romana>
- Cuartero Sáez, A. (2017). Guía de prácticas de topografía en edificación. Cuaderno de prácticas de laboratorio. <https://dehesa.unex.es/handle/10662/5589>
- DANE. (2012). Atlas Estadístico de Colombia. Bogotá D.C. Obtenido de <https://geoportal.dane.gov.co/servicios/atlas-estadistico/>
- Diario La República. Recuperado el 27 de julio de 2022, de <https://www.larepublica.co/economia/por-cada-colombiano-hay-1-2-lineas-moviles-activas-segun-el-mintic-2589009>
- Deakin, R. E. (Marzo de 2006). ResearchGate. Obtenido de https://www.researchgate.net/publication/228673869_TRAVERSE_COMPUTATION_ON_THE_UTM_PROJECTION_FOR_SURVEYS_OF_LIMITED_EXTENSION



- Doble, Samuel. (2004). "El mundo de las mallas de la cartografía: de los primeros geógrafos, Ptolomeo". En: ILUIL vol (27), pp: 645-678
- Buzai, G. (2017). "El mapa de Anaximandro: el primer aporte geográfico a la racionalidad científica". En: Boletín de Estudios Geográficos, (108). pp: 33-48. Recuperado de: https://bdigital.uncu.edu.ar/objetos_digitales/10262/boletn-108-pdf-estudios-geo-33-48.pdf
- Edu.Mx. Retrieved July 28, 2022, from http://www.upt.edu.mx/Contenido/Investigacion/Contenido/TESIS/MDS/2019/MDS_T_2019_02_VTM.pdf
- Equipo Consultoría Geografía Urbana. (2020). Plan de Ordenamiento Territorial Santa Marta. Colombia. Obtenido de https://www.santamarta.gov.co/sites/default/files/diagnostico_anexodimensionproductiva.pdf
- Equipo Consultoría Geografía Urbana. (2020). Plkan de Ordenamiento Territorial Santa Marta. Diagnostico - Anexo Dimension Productiva. Obtenido de https://www.santamarta.gov.co/sites/default/files/diagnostico_anexodimensionproductiva.pdf
- Escalante, N. (05 de Julio de 2015). IGAC - Instituto Geográfico Agustín Codazzi,. Obtenido de <https://www.camara.gov.co/sites/default/files/2017-10/El+catastro+multiprop%C3%B3sito+herramienta+fundamental+del+PND+para+ordenar+el+territorio+Nieto+Escalante.docx.pdf>
- Evaluación de la precisión en la ortorrectificación de imágenes de muy alta resolución espacial utilizando conjuntamente puntos extraídos de bloques fotogramétricos y Modelos digitales de Elevación provenientes de distintas fuentes. (s.f.).
- Función Pública. (7 de Diciembre de 2015). Decreto 2363 de 2015. Colombia. Obtenido de <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=67314>
- GeoEnciclopedia. (S.F.). "¿Qué es la cartografía? Descripción y características de la cartografía". En: sitio web: GeoEnciclopedia. Recuperado de: <https://www.geoenciclopedia.com/que-es-la-cartografia/>
- Geomarketing. (2018). "El origen de la cartografía y la historia de los mapas (I)". En: Quantic Smart Data. Recuperado de: <https://www.quanticsolutions.es/geomarketing/el-origen-de-la-cartografia-y-la-historia-de-los-mapas-#:~:text=La%20antigua%20Grecia%20es%20el,a%20escala%20los%20territorios%20conocidos.>
- Huerta, E., Mangiaterra, A., & Noguera, G. (2005). GPS. Posicionamiento Satelital. https://d1wqxts1xzle7.cloudfront.net/35417667/libro_gps-with-cover-page-v2.pdf?Expires=1659023390&Signature=ByBsPiqTFo-ffQWq89~sg7-11jHNa--W~La83Uyeq6YToAWi5B1tcQ~pWT8DmiDs0FHVV~Wle52SCqz7ZpgzRU3IEau~ePkwaA-PIeM9vBpg0hKAMOsTjmh8UDpSA8iZcxt77IPmaz9Za99CaTVvXymO62CsjyvsBTQPzZuiC7HfI
- Ingeoexpert. (2019). "¿Qué es la cartografía? Características y evolución". En: Sitio web Ingeoexpert. Recuperado de: <https://ingeoexpert.com/2019/01/25/que-es-la-cartografia-caracteristicas-y-evolucion/>
- IGAC. (14 de Mayo de 2020). Resolución 471. Colombia. Obtenido de https://igac.gov.co/sites/igac.gov.co/files/normograma/resolucion_471_de_2020.pdf
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi - SNR. (31 de Diciembre de 2020). Resolución conjunta. Colombia. Obtenido de https://www.igac.gov.co/sites/igac.gov.co/files/normograma/resolucion_conjunta_igac_1101_snr_11344_de_2020.pdf
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi. (Octubre de 2004). Aspectos Prácticos de la Adopción del Marco Geocéntrico Nacional de Referencia MAGNASIRGAS como Datum Oficial de Colombia. Colombia. Obtenido de https://www.igac.gov.co/sites/igac.gov.co/files/aspectos_practicos.pdf
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi. (Mayo de 2004). Tipos de Coordenadas Manejadas en Colombia. Colombia. Obtenido de https://www.igac.gov.co/sites/igac.gov.co/files/anexo_8_tipos_de_coordenadas_manejados_en_colombia_igac_ano_2004.pdf
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi. (28 de Enero de 2005). Diario Oficial 45.812. Resolución 068. Obtenido de https://idesc.cali.gov.co/rcg/RESOLUCION_068_DE_2005.pdf
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi. (4 de Febrero de 2011). Resolucion No. 0070. Colombia. Obtenido de https://www.igac.gov.co/sites/igac.gov.co/files/normograma/resolucion_70_de_2011.pdf



- Instituto Geográfico Agustín Codazzi. (2014). Metofología Definición orígenes planos cartesianos. Obtenido de https://www.igac.gov.co/sites/igac.gov.co/files/anexo_3_metodologia_para_la_definicion_origenes_planos_cartesianos.pdf
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi. (2017). Resolución validación técnica productos cartográficos. Tunja. Obtenido de <https://www.corpochivor.gov.co/wpdm-package/resolucion-1503-2017/>
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi. (30 de Mayo de 2018). Resolución 643. Colombia. Obtenido de https://www.igac.gov.co/sites/igac.gov.co/files/norma/resolucion_643_de_2018.pdf
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi. (Junio de 2020). ABC - Nueva proyección cartográfica. Colombia. Obtenido de [ABC_Nueva_Proyeccion_Cartografica_Colombia](https://www.igac.gov.co/sites/igac.gov.co/files/ABC_Nueva_Proyeccion_Cartografica_Colombia)
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi. (2020). Nuevo sistema de Proyección Cartográfica para Colombia - Origen - Nacional. Colombia. Obtenido de <https://origen.igac.gov.co/docs/FAQOrigenCartografico.pdf>
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi Gov.Co. Retrieved August, 2022, from https://www.igac.gov.co/sites/igac.gov.co/files/norma/resolucion_643_de_2018.pdf
- Lopez Morales, O. L. (05 de Junio de 2020). Resolución 529 de 2020. Bogotá D.C, Colombia. Obtenido de <https://repository.unimilitar.edu.co/bitstream/handle/10654/38142/GonzalezLarrarteYulianLeonardo2020.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Lukman, Abdulmumin & Isioye, Olalekan & Swafiyudeen, Bawa & Muhammed, Ahmed. (2020). Exploring the Usability and Suitability of Smartphone Apps in Precise and Rapid Mapping Application.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (23 de Diciembre de 2016). Resolución No. 2182. Colombia. Obtenido de <https://www.minambiente.gov.co/images/normativa/app/resoluciones/ef-Resoluci%C3%B3n%202182%20de%2023%20de%20diciembre%20de%202016%20-%20MODIFICACI%C3%93N%20GEODATA%20ASE.PDF>
- Piqueras, Juan. (2016). “La geografía del Ptolomeo y su transmisión al Islam y occidente cristiano”. En: Cuadernos de geografía, N. 19 (52), pp: 19-52.
- Porro, Jesús. (2011). “La cartografía histórica como fuente para la investigación histórica y patrimonial (antigüedad y edad media)”: En: Revista ph del Instituto Andaluz de Patrimonio Histórico, (77), pp: 54-61.
- Raffino, Maria. (2020). “Cartografía: concepto, historia, ramas, elementos, y usos”. En: Concepto, sitio web. Recuperado de: <https://concepto.de/cartografia/>
- Rodolfo, F. (05 de Agosto de 2020). Mixdyr. Obtenido de <https://mixdyr.wordpress.com/tag/colombia/>
- Rozo, D. (23 de Septiembre de 1952). Historia de la Cartografía en Colombia. Artículo del Boletín de la Sociedad Geográfica de Colombia . Bogotá D.C. Obtenido de https://www.sogeocol.edu.co/documentos/010_04_Hist_de_cart_de_col.pdf
- Salvini, D., & Bolivar, F. A. (01 de Mayo de 2018). Modernización de la Administración de tierras en Colombia - Propuesta de la Proyección Cartográfica única para la Administración de Tierras en Colombia. Versión 2.0. Colombia. Obtenido de https://www.cpnt.gov.co/images/pdf/Documentos_t%C3%A9cnicos_y_Publicaciones/CTM12_Proposal_v2-2018.06.01_compressed.pdf
- Sánchez, L., & Trejos, J. (2020). Procedimiento para la migración a MAGNA-SIRGAS de la cartografía existente referida al Datum Bogotá. Obtenido de https://www.igac.gov.co/sites/igac.gov.co/files/procedimiento_migracion.pdf
- Sociedad Colombiana de Ingenieros. (13 de Agosto de 2020). PDFCOFFEE. Obtenido de <https://pdfcoffee.com/sci-concepto-tecnico-ctm-12-4-pdf-free.html>
- Swiss Tierras Colombia. (2020). Proyección Cartográfica Origen Nacional. Colombia.
- Tovar, A. (2021). Analisis Nuevo Origen Colombia.
- Vargas, J. E. (17 de Mayo de 2021). Análisis del Nuevo Origen nacional de Colombia. Bogotá D.C, Colombia. Obtenido de <https://www.slideshare.net/JairoVargas5/analisis-ctm12-origen-nacional-248329157>

Acercamiento a identificación de errores en nubes de puntos Approach to identifying errors in point clouds

Received: 02 02 2024, Accepted: 21 06 2024, Available online: 08 07 2024

Valeria Gutiérrez Cárdenas
Ingeniería topográfica; Integrante semillero de investigación TOPOCOORS, Facultad de Medio Ambiente y recursos Naturales. Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Bogotá D.C., Colombia. vgutierrezc@udistrital.edu.co

Jhon Fredy López López
Msc. Ciencias de la información. Ing. Topográfico, Profesor, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, proyecto curricular de Tecnología en Saneamiento ambiental. jflopezl@udistrital.edu.co
<https://orcid.org/0000-0001-9851-6287>

Juan David Méndez Niño
Msc. Ciencias Geomáticas. Esp. Gerencia, Gobierno y asuntos públicos. Ing. Topográfico. judameni@gmail.com.
<https://orcid.org/0009-0008-4601-6709>

Resumen

Con el paso del tiempo, la tecnología enfocada en la toma de datos para la digitalización de distintos tipos de terreno ha evolucionado constantemente, en la actualidad dispositivos como LiDAR (Light Detection and Ranging) cuyo sistema permite determinar la distancia desde un emisor laser hasta un objeto o superficie generando nubes de puntos en cortos lapsos de tiempo, que en conjunto con el uso de equipos como drones, resulta ser una de las más precisas y evolucionadas brindando calidad y rendimiento para distintas aplicaciones en trabajos de ingeniería, no obstante, este documento pretende hacer la revisión de fuentes y modelos de errores sistemáticos en esta tecnología y equipos, con un enfoque que abarca la tecnología LiDAR haciendo uso de distintos sistemas, como lo es el de tipo flotante (FLS) y los móviles de mapeo (MLMS), así como el de sensores aerotransportados (ALS) y móviles (MLS) teniendo en cuenta diversos aspectos tales como las sombras, puntos falsos, de geolocalización y georreferenciación, desplazamiento de rango, precisión en la elevación y ángulo de escaneo, entre otros, aplicados en una serie de ejemplos basado en proyectos como doseles forestales, batimetrías, energía eólica, estructuras y otros proyectos ingenieriles, con lo que a su vez finalmente, revisar alternativas con el fin de dar solución a los errores sistemáticos previamente mencionados y otros relacionados (como el uso de voxels esféricos, ALS de alta precisión, dinámica de fluidos computacional, algoritmos, entre otros), así como los causales de los mismos en diferentes áreas de trabajo y tipos de proyectos, todo esto con el fin no solo de exponer e interpretar estas problemáticas o errores sino también de brindar soluciones a las mismas.

Palabras clave: ALS, MLS, MLMS, FLS, LiDAR, UAV, Drones, Errores sistemáticos, Georreferenciación, Precisión, nubes de puntos

Abstract

With the passage of time, the technology focused on data collection for the digitization of different types of terrain has constantly evolved, currently devices such as LiDAR (Light Detection and Ranging) whose system allows to determine the distance from a laser emitter to an object or surface generating clouds of points in short periods of time, that in conjunction with the use of equipment such as drones, it turns out to be one of the most accurate and evolved providing quality and performance for different applications in engineering work, however, this document aims to review sources and models of systematic errors in this technology and equipment, with an approach that covers LiDAR technology using different systems, such as floating type (FLS) and mobile mapping (MLMS), as well as airborne (ALS) and mobile (MLS) sensors taking into account various aspects such as shadows, false points, geolocation and georeferencing, range shift, elevation accuracy and scanning angle, among others, applied in a series of examples based on projects such as forest canopies, bathymetry, wind energy, structures and other engineering projects, with which in turn finally, review alternatives in order to solve the systematic errors previously mentioned and others related (such as the use of spherical voxels, high precision ALS, computational fluid dynamics, algorithms, among others), as well as the causes of them in

different areas of work and types of projects, all this in order not only to expose and interpret these problems or errors but also to provide solutions to them.

Key Words: ALS, MLS, MLMS, FLS, LiDAR, UAV, Drones, Systematic errors, Georeferencing, Accuracy, point clouds

1. Introducción

La tecnología LiDAR (Light Detection And Ranging) permite medir la distancia entre un sensor y un objeto, a través de un rayo de luz láser para obtener medidas de posicionamiento georeferenciadas mediante modelos digitales tridimensionales de alta precisión, lo que ha llevado a una gran evolución en procesos cartográficos y de diseño, en diferentes campos de la ingeniería, en aplicaciones como modelación 3d de infraestructuras, digitalización de ambientes, inventarios ambientales, entre otras, esta tecnología puede ser desarrollada con diferentes sensores, ya sea de tipo aéreo (ALS), de tipo móvil (MLS) entre otros y presenta resultados con bastante eficiencia y rapidez.

Los modelos han sido durante mucho tiempo un tema activo en muchos campos de investigación, como la visión por computadora y la fotogrametría. Con el rápido desarrollo de la tecnología de sensores, las nubes de puntos se obtienen fácilmente y se han convertido en el tercer tipo de datos geográficos estándar, después de los mapas y las imágenes, estas enormes nubes de puntos con alta precisión se pueden utilizar para describir el mundo real y hacer posible la reconstrucción de modelos de edificios 3D en un área grande (H. Pingbo et al., 2020) En las últimas décadas, se ha propuesto un gran número de algoritmos y sistemas para reconstruir modelos de construcción y se han logrado avances prometedores con la automatización asociada, la escala de reconstrucción y los modelos de salida (B. Xiong et al., 2014).

A diferencia de los sensores de imagen, la detección y el alcance de la luz (LiDAR) proporcionan mediciones 3D directas que se pueden utilizar para la evaluación cuantitativa. Los escáneres láser terrestres (TLS) pueden adquirir nubes de puntos de alta resolución con precisión milimétrica, considerada como el estándar de oro en la gestión de la construcción y el monitoreo de infraestructura. Sin embargo, el tiempo y la mano de obra necesarios para la adquisición de datos y el procesamiento posterior aumentan significativamente para un sitio grande (D. Bullock et al., 2021).

En el desarrollo de temas como la georeferenciación, el escaneo láser aerotransportado (ALS) es una de las tecnologías de mapeo más precisas en la actualidad (Shrestha et al., 2010) no obstante, la exactitud y precisión en general de los datos obtenidos del sistema depende de la construcción de sus diferentes componentes, puesto que las observaciones suelen estar corrompidas con errores

sistemáticos, el efecto de estos errores se evidencia en la posición y precisión de elevación de los puntos de tierra tomados con LiDAR en detalle.

Durante el proceso posterior de las observaciones de ALS es posible realizar una estimación y ajuste de estos errores, que se presentan principalmente en datos con una dinámica alta de vuelo sobre topografías montañosas, o por el contrario en terrenos que posean muy pocas características. En el caso por ejemplo de los modelos de estructura forestal, si bien el uso de estos dispositivos es de gran ayuda, este tipo de errores tiene cierto grado de relevancia y magnitud, ya que conlleva un nivel de incertidumbre en las estimaciones del modelo, por lo que es imperativo considerar cuidadosamente su integración (Silva et al., 2021).

A lo largo de los últimos años, los sistemas LiDAR móviles (MLS) han evolucionado de una tecnología geomática anticuada, costosa e inalcanzable, a una técnica de topografía más fácil de usar y accesible para la adquisición de nubes de puntos georeferenciadas (Larouche et al., 2020) es posible categorizarlo en funciones como MLS terrestres, marinos y aéreos, cuya tecnología ha permitido una obtención de nubes de puntos georeferenciadas con mayor rapidez y a menor costo que otras técnicas de topografía convencional. Un MLS consta de dos componentes principales, un sistema de posición y orientación (POS) y un escáner LiDAR, no obstante, la interconexión entre estos componentes puede verse afectada por errores sistemáticos y no sistemáticos que degradan la calidad de los puntos georeferenciados finales. Los principales errores sistemáticos son los ángulos de visión POS-LiDAR, los brazos de palanca POS-LiDAR, el desplazamiento de rango y el desplazamiento del ángulo de escaneo, infortunadamente estos errores tienen un efecto sistemático, repetitivo y constante en los datos (Brown et al., 2005).

2. Tecnología LiDAR Aplicada En Proyectos de Topografía

La Topografía y la Geodesia están en constante evolución, innovación e implementación de tecnologías como son los sensores remotos aerotransportados (sistemas como LiDAR) y sistemas satelitales de posicionamiento global (GNSS), lo cual resulta en la generación de metodologías

para lograr precisiones acordes a las exigencias de los proyectos (H. A. Casallas, 2019).

En la actualidad la topografía ha sufrido cambios tan revolucionarios y significativos, que, con la aplicación de equipos modernos y apoyados en la fotogrametría y tecnología LiDAR, podemos realizar los levantamientos topográficos cada vez más rápida y precisa, logrando prescindir significativamente de personas para dicho trabajo; estos resultados son de suma importancia para el diseño de proyectos de ingeniería. El uso de equipos topográficos convencionales no nos permitiría realizar trabajos de ésta envergadura en el tiempo idóneo ni con la precisión requerida, sin embargo, si utilizaría un mayor personal (F.D. Sedano et al., 2018).

La planificación estratégica es un elemento esencial en el aprovechamiento sostenible de los recursos en diversas actividades del desarrollo. Esa planificación demanda la implementación óptima de nuevas tecnologías en la captura, procesamiento y generación de datos geoespaciales de alta calidad y precisión, orientados a la automatización de procesos para el incremento de la eficiencia basada en el conocimiento (M. J. Westoby et al., 2015), es por ellos que los vehículos aéreos no tripulados (UAV) se están convirtiendo en una herramienta tecnología muy versátil en diversas áreas de aplicación para actividades del desarrollo. En la topografía, como área fundamental de la ingeniería, aporta información relacionada con la ubicación tridimensional de puntos en la superficie terrestre (H. Pacheco et al., 2022), cabe resaltar que, para garantizar la precisión de datos en vuelos fotogramétricos se debe contar con puntos de control terrestre (GCP) para obtener precisiones confiables en el posicionamiento absoluto y calibración de los parámetros de orientación interna de la cámara. Para mejorar las capacidades de posicionamiento preciso de los GPS convencionales en los UAV, las capacidades GNSS, de fase multiportadora conocida como Cinemática en Tiempo Real (RTK), son altamente recomendadas (M. Stronner et al., 2020)

No obstante, es importante mencionar que, la cobertura LiDAR es similar a la obtenida en fotogrametría, pero tiene la capacidad de poder atravesar la cobertura vegetal para medir el suelo, donde los operadores de fotogrametría no pueden medir, generando datos con mayor densidad que en fotogrametría. Por tanto, el LiDAR se convirtió en una alternativa óptima por ser un método rápido, preciso y directo para obtener datos 3D (S. G. Garre et al., 2013), a modo de ejemplo, en una comparativa realizada entre ambas tecnologías para una zona rural de terreno montañoso, la información que arroja el LiDAR es precisa, confiable y contundente a la hora de representar el terreno. El MDT obtenido por procesos fotogramétricos muestra un 33% de áreas de pérdida de información, lo cual hace que su información no sea confiable por si sola y requiera de procesos topográficos convencionales que la complementen (M. P. Avella, 2022).

Por otra parte, la actualización catastral en las diferentes autoridades catastrales de Colombia se desarrolla generando visitas a campo, de forma que se establecen grupos de trabajo (cuadrillas) que van visitando predio a predio con el fin de confrontar las condiciones actuales del inmueble con las descritas en la base cartográfica con la que cuenta la entidad. Este proceso puede resultar en una deficiencia en el reporte de la actualización catastral, ya que es una actividad que representa retrasos en cuanto a tiempo y altos impactos económicos de cara a lo que implica la actualización de los avalúos catastrales como base de cálculo de los impuestos prediales. Es por esta razón, que una metodología alternativa para adelantar el proceso de actualización catastral empleando herramientas de percepción remota, específicamente al uso de drone con LiDAR, dadas sus características técnicas y utilidad respecto a las propuestas de catastros multipropósitos en los que se considera emplear barridos prediales (A. M. Castañeda et al., 2019).

Por otra parte, la tecnología siempre ha hecho parte de la evolución del hombre y en el desarrollo de sus procesos metodológicos, para la toma de datos y medición en las áreas de las ciencias exactas podemos observar la creación de nuevas tecnologías que ofrecen una mayor versatilidad y nuevos campos de estudio hasta el momento desconocidos o difíciles de alcanzar. Al unir la tecnología Drone con los nuevos conceptos de modelación de terrenos y espacios en conjunto con los nuevos softwares y existentes se logra un gran avance, debido a la versatilidad y economía de los procesos hasta ahora desconocidos, los factores de seguridad y comodidad, la agilidad con la que se lleva a cabo estos procesos de reconocimiento (C. A. Puerta, 2015).

En la actualidad, los escáneres 3D utilizando la tecnología LiDAR, son herramientas de gran utilidad en el diseño en ingeniería. Estos equipos permiten obtener objetos virtuales óptimos para realizar todas las simulaciones requeridas en un proceso de diseño (J. D. Cock, 2000), no obstante, es importante mencionar que esta tecnología en algunas situaciones donde las características del terreno son complejas, presenta un leve error en el posicionamiento de coordenadas (X, Y, Z) para lo cual existe un método de triangulación que resulta ser eficaz a la hora de compensar esta falencia.

Teniendo en cuenta un enfoque topográfico, el mapeo de ciudades es un sistema en constante cambio, las ciudades requieren ser clasificadas y cartografiadas periódicamente para realizar actualizaciones catastrales y evaluar áreas verdes urbanas, entre otras problemáticas de los recursos naturales y urbanos para la generación de bases para las políticas públicas referentes al desarrollo sustentable.

El sistema LIDAR es una herramienta tecnológica para crear información 3D con demostrada utilidad y eficacia para resolver los problemas de resolución espacial más rápido y preciso que la fotogrametría convencional, la tecnología LIDAR genera datos combinables con otros

sensores, esta metodología de procesamiento consiste en organizar datos, eliminar errores, obtener modelos digitales del terreno (DTM) y modelos digitales de superficie (DMS), con el fin de diseñar e implementar filtros para clasificar la superficie (F. D. Yepes et al., 2012).

Asimismo actualizar la cartografía urbana de forma automática utilizando datos LiDAR y SIG (Sistema de Información Geográfica) es de gran utilidad a la hora de disponer de cartografía urbana a grandes escalas, la generación de cartografía urbana tridimensional (3D) resulta ser bastante útil tanto para los ciudadanos como, sobre todo, para la propia gestión municipal, ya que los distintos proyectos pueden calcularse, analizarse y mostrarse fielmente junto con su entorno. En consecuencia, su demanda se ha incrementado notablemente en los últimos años dado el valor añadido que presenta disponer de cartografía 3D en entornos urbanos (J. S. Lopera et al., 2012).

Acompañado de esta tecnología, es importante destacar el uso de diferentes softwares y algoritmos con el fin de procesar, analizar y clasificar la información obtenida, estos algoritmos abarcan la totalidad de fases propias del tratamiento y pre procesamiento de datos LiDAR, desde la organización de la nube de puntos en estructuras espaciales de datos hasta la definición del vecindario, la segmentación en superficies continuas, la detección y filtrado de errores groseros y la clasificación de las distintas entidades que componen la escena (J. L. Lerma, 2015) por ejemplo, con el objetivo de extraer el área edificada de un entorno urbano, se precisan algoritmos que permitan diferenciar puntos LiDAR tomados sobre edificaciones del resto de puntos. Además, una vez que se tengan clasificados estos puntos, se deseará obtener el límite de los objetos que representan para, con ello, extraer las superficies edificadas (J. J. Arranz et al., 2018). Una muestra de ello, es el algoritmo iterativo mejorado de punto más cercano (ICP) que combina el algoritmo de consenso de muestra aleatoria (RANSAC), las firmas de formas intrínsecas (ISS) y el contexto de forma 3D (3DSC). El método utiliza en primer lugar el filtro de rejilla de vóxel para el muestreo descendente. A continuación, los puntos de característica son extraídos por el algoritmo ISS y descritos por el 3DSC. Posteriormente, las características de ISS-3DSC se utilizan para el registro aproximado con el algoritmo RANSAC. Finalmente, el algoritmo ICP se utiliza para un registro preciso. Los resultados experimentales muestran que el algoritmo propuesto tiene una velocidad de registro más rápida que otros algoritmos, al tiempo que mantiene una alta precisión de registro (X. Guangxuan et al., 2021).

3. Errores Sistemáticos En Tecnología LiDAR Aerotransportada (ALS)

Los datos de una amplia gama de técnicas de medición, como la topografía terrestre, las imágenes fotogramétricas aerotransportadas, el escaneo láser aerotransportado (LiDAR), el radar de apertura sintética interferométrica (InSAR) se utilizan comúnmente para generar DEM en la actualidad. Entre estas técnicas, LiDAR aerotransportado es bastante efectivo y confiable para generar un DEM de alta calidad con resolución densa en un área de estudio típica (S. Erol et al., 2020) Además de los aspectos favorables de Airborne-LiDAR (ALS) frente a la topografía terrestre y la fotogrametría en la generación de DEM que hacen de esta técnica casi una práctica estándar en aplicaciones de datos espaciales, ciertos puntos relacionados con el procesamiento de datos LiDAR sin procesar requieren una atención especial y hacen que esta técnica sea exigente (L. Xiaoye, 2008).

El uso de sensores LiDAR (Light Detection And Ranging) aerotransportados (ALS) para la cartografía topográfica se está convirtiendo rápidamente en una práctica estándar en la comunidad de aeroservicios. Los condados están recopilando dichos datos para una variedad de propósitos de gestión: evaluación de aguas pluviales, control de inundaciones, visualización, etc. (M.E Hodgson et al., 2016) no obstante, para este tipo de proyectos las principales fuentes de error posicional en el proceso de recolección LiDAR están asociadas con el equipo del Sistema de Posicionamiento Global (GPS) a bordo de la aeronave, la unidad de navegación inercial (INU) para estimar posiciones entre las correcciones de GPS y la unidad de medición inercial (IMU) para monitorear la dirección de apuntamiento del láser. (Z. H. Bowen et al., 2002).

Otro de los errores sistemáticos común en este tipo de tecnología es la presencia de sombras en los resultados finales, estas sombras son producidas cuando las regiones de los alrededores se encuentran ocluidas o sombreadas por un objeto más cercano, los bordes de estas regiones se mueven cuando el LiDAR se mueve y este movimiento transgrede la suposición de los alrededores son estáticos y con ello se generan sesgos o errores sistemáticos en el proceso de coincidencias a la hora del escaneo (McDermott & rife, 2022). Los métodos existentes de coincidencia de escaneo se dividen en tres categorías: métodos de aprendizaje automático (ML) de extremo a extremo, cuya función es relacionar directamente dos nubes de puntos, métodos basados en características cuya función es clasificar en grupos los puntos, como estructuras geométricas reconocibles en nubes y métodos basados en “vóxeles” que agrupan puntos a través de una cuadrícula con el fin de permitir la alineación entre nubes. Por otra parte, en lo que respecta a los datos recolectados, los errores de posición siguen siendo sustancialmente grandes (Schenk, 2001), dichos errores introducen sesgos

significativos en la elevación particularmente en terrenos con alto relieve y aplicaciones como la detección de fallas geológicas, las detecciones de líneas centrales de corrientes entre otros pueden verse directamente afectadas por magnitudes pequeñas de errores en posiciones y elevaciones (Shrestha et al., 2010). Para garantizar la precisión del resultado final de los datos obtenidos por un dispositivo aerotransportado LiDAR (ALS) se requiere de un extenso postprocesamiento de los datos, a partir de ello es posible generar una comparativa y corrección de los datos recopilados con la realidad del suelo, esto se conoce como ajuste absoluto.

El análisis de los datos recopilados con el uso de Airborne Light Detection And Ranging (ALS) ha sido de interés para muchos investigadores durante muchos años, y se ha convertido en un estándar de la industria para muchas aplicaciones. El desafío más importante en este dominio es desarrollar algoritmos automáticos de extracción y clasificación de elementos para una nube dada de puntos que describa diferentes clases, como suelo, vegetación o edificios (M. Kuprowski et al., 2023).

Continuando con el uso de esta tecnología en la implementación de procesos constructivos basados en la recolección de nubes de puntos, los modelos urbanos tridimensionales son una parte integral de numerosas aplicaciones, como la planificación urbana y la simulación del rendimiento, el mapeo y la visualización, la capacitación en respuesta a emergencias y el entretenimiento, entre otros. Consolidamos la datación de varios algoritmos propuestos para reconstruir modelos 3D de objetos urbanos a partir de nubes de puntos (W. Ruisheng et al., 2018).

Cabe mencionar que, existe una metodología que permite la reconstrucción automatizada y eficiente de modelos geométricos de edificios tridimensionales (3-D) a partir de una nube de puntos de escaneo láser aerotransportado (ALS) que analiza y evalúa su rendimiento, este método evita soluciones anormales y/o infinitas que se encuentran típicamente en métodos publicados anteriormente que utilizan la matriz de adyacencia primitiva de tejado para resolver los vértices críticos de tejado (C. Dong et al., 2014), es por ello que, como propuesta a este tipo de error existe un algoritmo mejorado de consenso aleatorio (RANSAC) para segmentar las primitivas de los tejados, es decir, los parches planos que constituyen los tejados, de cada edificio o grupo de edificios conectados (S. O. Elberink et al., 2011).

A partir de un proceso de simulación fue posible analizar el impacto de los errores o sesgos sistemáticos en los parámetros espaciales y rotacionales sobre una nube de puntos derivada este proceso comienza a partir de una superficie y trayectoria simuladas dadas, que luego se utilizan para derivar las mediciones del sistema tales como rangos, ángulos de espejo, información de posición y orientación para cada pulso, posteriormente se agregan errores a los parámetros del sistema, con el fin de

reconstruir la superficie a través de una ecuación LiDAR, finalmente las diferencias entre las coordenadas contaminadas por errores y las verdaderas dadas por las huellas dentro del área mapeada, se utilizan para representar el impacto de un error sistemático dado en los parámetros o mediciones del sistema (A. P. Kersting et al., 2008).

Debido a la presencia de estos errores, las coordenadas finales evidencian discrepancias sistemáticas, a partir de ello, fue posible determinar que las discrepancias causadas por el desplazamiento y los errores angulares pueden ser modelados mediante desplazamientos y una rotación a través de la dirección de vuelo. Por tanto, es posible usar como solución una transformación de cuerpo rígido de seis parámetros (tres turnos y tres rotaciones) para expresar la relación entre características conjugadas en tiras superpuestas y con ello corregir dichos errores.

Finalmente, a pesar de que las (ALS) están bien estructuradas en cuanto al monitoreo y registro 3D de paisajes secos y áreas urbanas se refiere, cuando se trata de aplicaciones batimétricas, se introducen errores sistemáticos debido a la refracción del agua, contrario a los procedimientos fotogramétricos en el agua donde, según previos estudios, una calibración exhaustiva es suficiente para corregir los efectos de la refracción, en los casos específicos a través del agua, las ondulaciones de la superficie del mar debidas a las olas y la magnitud de la refracción, difieren en cada punto de cada imagen, lo que conduce a soluciones inestables (D. Skarlatos et al., 2019), para corregir este error, es posible hacer uso de la ecuación de colinealidad estándar, con la que es posible realizar un ajuste o emparejamiento de los puntos tomados con las fotografías obtenidas, y con ello obtener datos de profundidad real con mayor exactitud (T. Dietrich, 2016).

4. Errores Sistemáticos En tecnología LiDAR de tipo Flotante (FLS)

Los sistemas LiDAR flotantes (FLS) son ampliamente utilizados para la evaluación de sitios eólicos marinos y sus mediciones muestran una buena concordancia en comparación con fuentes de referencia confiables (F. Kelberlau et al., 2022). Cabe mencionar que en el proceso de medición de las velocidades del viento a través de un LiDAR, se miden las velocidades del viento en la línea de visión (LoS) del rayo láser. Esta velocidad es un valor medio sobre el volumen de medición y el tiempo de medición el vector de viento resultante se puede calcular utilizando al menos tres velocidades LoS medidas para diferentes ubicaciones y generalmente para diferentes puntos en el tiempo (G. Wolken-Möhlmann et al., 2019). No obstante, se debe asumir cierta influencia del movimiento en los datos de velocidad media del viento de FLS, pero aún no se pudo cuantificar con métodos

experimentales porque las incertidumbres involucradas son mayores que el impacto esperado del movimiento, cabe mencionar que cuando no se corrigen las mediciones LiDAR de dichos sistemas LiDAR flotantes (FLS) se comparan con los valores de los sistemas LiDAR fijos del mismo tipo, y con ello se pueden observar varios efectos: En primer lugar, las estimaciones de la dirección del viento están influenciadas por el encabezado del FLS (J. Gottschall et al., 2014), en segundo lugar, las mediciones de estadísticas de segundo orden (por ejemplo, intensidad de turbulencia) son más altas porque el movimiento de la plataforma se suma a la varianza de velocidad del viento medida (M. A. Gutierrez et al., 2018).

Teniendo en cuenta lo anteriormente mencionado, y con el fin de presentar un ejemplo de esta situación, las mediciones de turbulencia de un LiDAR flotante instalado cerca de la plataforma costa afuera FINO1 en la bahía alemana se vieron fuertemente afectadas por el movimiento de la boya, por lo tanto, las estimaciones de intensidad de turbulencia (TI) requieren algún tipo de compensación de movimiento. Debido al movimiento de la boya, las fluctuaciones de velocidad medidas son generalmente mayores que las de los Lidares de viento fijos, copa o anemómetros sónicos. La diferencia depende de la amplitud y el período de movimiento de la boya (A. Peña et al., 2022), sin embargo, una forma de compensar el movimiento de la boya está basada en hardware. La compensación podría ser pasiva, por ejemplo, montaje en forma de cardán o resorte, o activa, es decir, utilizando el movimiento de la boya para "corregir" mecánicamente su posición (J. Gottschall et al., 2017).

Existen otras alternativas para corregir este error en la tecnología LiDAR de tipo flotante, como lo es un filtro mejorado para la corrección de movimiento LiDAR de viento Doppler flotante, el filtro se basa en un prototipo de filtro Kalman sin perfume para la corrección de movimiento LiDAR flotante sin acceso a las mediciones internas de línea de visión del LiDAR (A. Salcedo-Bosch et al., 2022) con el cual es posible corregir la turbulencia dada por el viento a partir de la combinación y estudios de diferentes modelos de viento.

5. Errores Sistemáticos En Tecnología LiDAR Móvil (MLS)

El rápido desarrollo de los sensores laser móviles (MLS) en la última década los ha convertido en herramientas populares para proyectos de topografía de corredores como la cartografía tridimensional urbana (3D) (Haala et al., 2008) la construcción de carreteras y ferrocarriles y muchos otros.

La tecnología LiDAR móvil adopta el método de medición activo, que no depende de la iluminación y puede obtener de manera eficiente datos 3D del espacio subterráneo (L. Huiyun et al., 2022). Sin embargo, el espacio subterráneo,

los signos GNSS son débiles o están bloqueados, lo que hace que la calidad de los datos de medición LiDAR móvil a lo largo del tiempo no pueda cumplir los requisitos de precisión de la medición (G. Ming et al., 2021).

Teniendo en cuenta lo previamente mencionado, en lo que respecta a los sensores laser móviles (MLS), los errores se convierten en una tarea algo compleja, esto se debe a que en este tipo de dispositivos, los errores sistemáticos y no sistemáticos se encuentran mezclados, por lo que para abordar esta problemática es imperativo el uso de un simulador MLS, enfocado principalmente en extraer la información de errores sistemáticos que afectan las nubes de puntos georreferenciadas, lo errores sistemáticos que abarcan dicha simulación son ángulos de visión POS-LiDAR, brazos de palanca POS-LiDAR, desplazamiento de rango y desplazamiento del ángulo de escaneo (M. H. Shahraji et al., 2020). Para ello, fue realizado un análisis independiente para cada uno de estos errores sugiriendo objetivos planos de iguales dimensiones con orientaciones verticales e inclinadas, a partir de esto y otros parámetros incluidos en la configuración de la simulación, fue posible obtener una nube de puntos precisa en la que son detectables los errores sistemáticos y con ello lograr una correcta calibración del MLS terrestre, y con ello obtener resultados de mayor precisión despreciando estos sesgos (Larouche et al., 2020).

Existen otros métodos de calibración enfocados primordialmente a la estimación de ángulos de visión del sistema, (error sistemático bastante común en los MLS) específicamente para un mapeo que involucra geometrías comunes, tales como fachadas de edificios, superficies de puentes, señales de carretera entre otros, El método evoca un ajuste de mínimos cuadrados para estimar simultáneamente varios conjuntos de ángulos de visión para múltiples escáneres láser incorporados en un MLS, así como parámetros asociados con uno o más tipos de características geométricas. Esto se realiza a partir de la restricción de grupos de nubes de puntos, con el fin de ajustar los modelos geométricos, con el fin de minimizar los errores sistemáticos producidos por la suma ponderada de cuadros en los residuos para el correcto ajuste, cabe mencionar que este método de calibración es aplicado de manera más fructífera en operaciones de toma de datos en campo (T. On Chan et al., 2013). Cabe mencionar que, las calibraciones realizadas en campo, tienen un mayor grado de efectividad, que las realizadas en por el fabricante (Shi et al., 2008). Todo esto con el fin de aumentar la precisión y disminuir los patrones de error en el resultado final para la entrega de nubes de puntos en zonas como las mencionadas previamente, si bien estos errores sistemáticos en este tipo de dispositivos no son de gran significancia, es de vital importancia solucionarlos, para brindar una mayor certeza y exactitud respecto a los datos finales obtenidos.

En cuanto a los sistemas móviles de mapeo LiDAR (MLMS), se han convertido en una herramienta destacada

para recopilar nubes de puntos densas y de alta calidad de una manera eficiente. Estudios previos informaron sobre el uso de MLMS para la detección automatizada de marcas de carril, la extracción de la línea central de la carretera, la evaluación de la pendiente de la pista, la inspección de escombros y pavimento, la extracción de señales de tráfico y la evaluación de la distancia de visión (H.Cai et al., 2008)

Por tanto el mapeo de zanjas utilizando LiDAR de alta resolución puede ser una alternativa eficiente a las encuestas de campo para priorizar y planificar el mantenimiento de zanjas, la información de tales datos del mundo real puede facilitar una mejora más amplia de la infraestructura vial y reforzar la base para el desarrollo de ciudades inteligentes (Y. -C Lin et al., 2021), no obstante, esto no significa que este tipo de tecnología sea perfecto, ya que también evidencia errores sistemáticos particularmente en la precisión de la nube de puntos, que está determinada principalmente por la referencia espaciotemporal proporcionada por POS (sistema de posición y orientación). Para resolver el problema de la adquisición precisa de datos de nubes de puntos en el entorno de mala señal GNSS o faltante, se utiliza un objetivo cooperativo tridimensional para proporcionar la referencia espaciotemporal para el recorrido, y el algoritmo de filtro de Kalman extendido (EKF) se utiliza para la fusión de datos para mejorar la precisión del cálculo de la trayectoria y reducir la deriva de error (L. Huiyun et al., 2021).

6. Errores Sistemáticos En Tecnología LiDAR en Terrenos Complejos

Cuando se habla de terrenos complejos, lo más común para reducir los posibles errores y garantizar una mayor calidad a la hora de presentar los resultados en el desarrollo de este tipo de proyectos es el uso de los Lidares Doppler, cuya principal función es la de medir las velocidades presentes en el viento (P. Ristori, et al., 2023), adicionalmente, en los últimos años, ha habido un progreso significativo hacia mediciones precisas y confiables del perfil del viento utilizando la tecnología Lidar (M. Courtney et al., 2008).

Este sistema resulta ser de gran ayuda en aplicaciones de energía eólica porque están fácilmente disponibles, son flexibles y fáciles de usar incluso en ubicaciones remotas, debido a la suposición de flujo homogéneo en sus algoritmos de reconstrucción de vectores de viento, los perfiladores LiDAR Doppler comunes sufren de reconstrucción errónea del vector de viento horizontal en condiciones de flujo no homogéneo que generalmente se encuentran en sitios de terrenos complejos (T. Klass et al., 2021).

Es por ello que se hace imperativo disminuir e identificar estas problemáticas haciendo uso de diferentes estrategias a partir de métodos que tienen como fin solucionar este tipo de falencias que se presentan en dicha tecnología, en

proyectos de energía eólica, una de las propuestas más elocuentes es el uso de modelos de flujo de viento, no obstante, existen otro tipo de soluciones relacionadas con proyectos de esta índole, uno de ellos el de el algoritmo de reducción de errores de turbulencia LiDAR, L-TERRA, que se puede aplicar utilizando solo datos de un Lidar independiente de perfil vertical y requiere un entrenamiento mínimo con datos de torres meteorológicas (J. Newman et al., 2017) este algoritmo ejecuta una serie de correcciones basadas en la física, que son fácilmente aplicables a la tecnología LiDAR y que además permite mitigar otros errores sistemáticos en estas tecnologías, como el ruido del instrumento y el promedio de volumen. En lo que a este tipo de proyectos con terrenos complejos respecta, finalmente cabe mencionar que el uso de la actualización rápida de alta resolución (HRRR) operativa brinda un análisis comparativo sobre diferentes errores y a su vez mayor una precisión en la información obtenida en campo (Y. Pichuguina et al., 2019).

Teniendo en cuenta que, uno de las problemáticas más destacadas en esta tecnología es la relación del viento con el equipo, en las velocidades del viento derivadas esta tecnología utiliza un modelo simplificado de flujo bidimensional sobre una colina idealizada para describir la influencia de una variación lineal de la velocidad vertical del viento en el error LiDAR, (F. Bingöl et al., 2008), en la mayoría de las aplicaciones de medición en el campo real, el terreno es más complejo y se han utilizado diferentes modelos de diferentes complejidades para estimar este error LiDAR, es por ello que desde hace poco, las herramientas de dinámica de fluidos computacional (CFD) disponibles comercialmente ofrecen un "módulo de corrección LiDAR" (por ejemplo, Meteodyn WT y WindSim) para terrenos complejos (T. Klass et al., 2015). Este tipo de corrección basado en la dinámica de fluidos computacional (CFD) evidencia una mejora en el rendimiento de esta tecnología, ya que, en un terreno complejo con velocidades de viento elevadas, a partir de una comparativa antes de aplicar la corrección se observa una gran subestimación, tal sesgo, que se debe a una suposición homogénea, se elimina significativamente después de la corrección (S. Nabi et al., 2019), cabe mencionar que este sesgo también se puede corregir combinando la geometría del instrumento con el campo de flujo previsto. Dado que el modelo es recto, el sesgo puede corregirse fácilmente, y el modelo también se presta a una comprensión (S. Bradley., 2012) lo que finalmente brinda una solución efectiva a los diversos errores sistemáticos existentes a la hora de realizar trabajos con esta tecnología en terrenos complejos.

7. Conclusiones

El uso de la tecnología LiDAR ha evolucionado de forma constante a lo largo de los años con el fin de facilitar la obtención de información en distintos procesos para el

desarrollo de trabajos de ingeniería, como lo son, por ejemplo, batimetrías, modelos digitales del terreno, edificaciones en tercera dimensión, cartografía y muchos otros, no obstante, es importante destacar, que a pesar del alto grado de precisión en sus resultados, esto implica una amplia variabilidad en cuanto a costos se refiere, esto teniendo en cuenta una breve comparativa entre lo que implica la utilización de esta tecnología y otras de tipo convencional.

A partir de la información consultada en este documento es posible concluir, que con el paso del tiempo las tecnologías ha evidenciado grandes mejoras y procesos evolutivos en cuanto a la solución de errores sistemáticos para estos sistemas se refiere, particularmente para los sensores laser aerotransportado (ALS) , ya que en ellos, se evidencian distintas problemáticas dependiendo el tipo de trabajo o proyecto que se desee realizar, mientras que para sensores móviles (MLS) los errores suelen ser de tipo similar sin tener tanto en cuenta las condiciones del terreno, los distintos métodos de calibración, que dan solución a distintos tipos de sesgos evidenciados en ambos sistemas, presentan soluciones tangibles y de gran ayuda, mejorando así la calidad en la precisión de los datos y la información recolectada, no obstante, es posible evidenciar que a pesar del gran avance tecnológico y los buenos métodos de calibración los errores siguen presentándose, y se vuelve imperativo un análisis a profundidad del diseño de estos sistemas para no requerir calibraciones externas.

A pesar de que en este tipo de tecnología existe una amplia variedad en lo que a errores sistemáticos se refiere, es importante destacar que, a partir de ello, se ha generado una amplia gama para dar solución a los mismos, ya sea a partir del uso de algoritmos, hardwares, simulaciones, aplicación de distintos modelos, entre otros, no obstante, se debe tener en cuenta la presencia de estos errores, y con ello determinar la solución más adecuada dependiendo la índole de los mismos.

Adicionalmente es de gran importancia mencionar, que estos sistemas son de gran ayuda a la hora de realizar diversos trabajos de levantamientos cartográficos y topográficos que conllevan un menor uso de presupuesto y tiempo, lo que los convierte en sistemas altamente eficientes, y que en comparación a prácticas topográficas más rudimentarias evidencia un mayor nivel de precisión en cuanto a modelado de superficies se refiere.

Referencias Bibliográficas

M. H. Shahraji , C. Larouche¹ & M. Cocard¹ (2020) Analysis of systematic errors of mobile lidar systems: a simulation approach

Matthew McDermott & Jason Rife, (2022) Mitigating Shadows in Lidar Scan Matching using Spherical Voxels

Ting OnChana, Derek D.Lichtia & Craig L.Glennieb, (2013) Multi-feature based boresight self-calibration of a terrestrial mobile mapping system

F. Habib a, M. A-Durgham , A. P. Kersting a & P. Quackenbushb (2008) Error budget of lidar systems and quality control of the derived point cloud

P. Agrafiotis, D. Skarlatos, A. Georgopoulos, & K. Karantzalos (2019) Shallow water bathymetry mapping from uav imagery based on machine learning

Jinling Wang, Ali Almagbile & Andrew Lambert (2009) Adding Optical Flow into the GPS/INS Integration for UAV navigation

Elliot S. Shannon, Andrew O. Finley, Daniel J. Hayes, Sylvia N. Noralez, Aaron R. Weiskittel, Bruce D. Cook⁴ & Chad Babcock (2022) Quantifying and correcting geolocation error in sampling lidar forest canopy observations using high spatial accuracy als: a case study involving gedi

Mathias Tesche & Ina Mattis, (2019) Systematic error of lidar profiles caused by a polarization-dependent receiver transmission: Quantification and error correction scheme

D. Pérez-Ramírez, D. N. Whiteman, I. Veselovskii, A. Kolgotin⁴, M. Korenskiy, & L. Alados-Arboledas (2013) Effects of systematic and random errors on the retrieval of particle microphysical properties from multiwavelength lidar measurements using inversion with regularization

Earth Lab (2022) Sources of Error in Lidar and Human Measured Estimates of Tree Height

Stuart Bradley (2012) A Simple Model for Correcting Sodar and Lidar Errors in Complex Terrain

Ming Guo, Bingnan Yan , Tengfei Zhou , Deng Pan , and Guoli Wang (2021) Accurate Calibration of a Self-Developed Vehicle-Borne LiDAR Scanning System

Jennifer F. Newman & Andrew Clifton (2017) An error reduction algorithm to improve lidar turbulence estimates for wind energy

Yi-Chun Lin, Raja Manish, Darcy Bullock & Ayman Habib (2021) Comparative Analysis of Different

Mobile LiDAR Mapping Systems for Ditch Line Characterization

S Nabi, N Nishio, P Grover, R Matai, Y Kajiyama, N Kotake, S Kameyama, W Yoshiki & M Iida (2019) Improving LiDAR performance on complex terrain using CFD-based correction and direct-adjoint-loop optimization

Tobias Klaas, Lukas Pauscher & Doron Callies (2015) LiDAR-mast deviations in complex terrain and their simulation using CFD

Ramazan Alper Kuçak, Serdar Erol & Bihter Erol (2021) The strip adjustment of mobile LiDAR point clouds using iterative closest point (ICP) algorithm

Michael Courtney, Rozenn Wagner & Petter Lindelöw (2021) Testing and comparison of lidars for profile and turbulence measurements in wind energy

Y. L. Pichugina, R. M. Banta, T. Bonin, W. A. Brewer, A. Choukulkar, B. J. Mccarty, S. Baidar, C. Draxl, H. J. S. Fernando, J. Kenyon, R. Krishnamurthy, M. Marquis, J. Olson, J. Sharp, & M. Stoelinga Spatial Variability of Winds and HRRR–NCEP Model Error Statistics at Three Doppler-Lidar Sites in the Wind-Energy Generation Region of the Columbia River Basin

Yi-Chun Lin, Jidong Liu, Yi-Ting Cheng, Seyyed Meghdad Hasheminasab, Timothy Wells, Darcy Bullock & Ayman Habib (2021) Processing Strategy and Comparative Performance of Different Mobile LiDAR System Grades for Bridge Monitoring: A Case Study

Huiyun Liu, Yongqiang Li, Baoshan Wang & Zengzhang Guo (2022) Research on Mapping Error Control of Underground Space Mobile LiDAR Constrained by Cooperative Targets

F. Bingöl, J. Mann & D. Foussekis (2008) Modeling conically scanning lidar error in complex terrain with WASP Engineering

Tobias Klaas-Witt & Stefan (2021) Emeis The five main influencing factors for lidar errors in complex terrain

Hubo Cai & William Rasdorf (2008) Modeling Road Centerlines and Predicting Lengths in 3-D Using LIDAR Point Cloud Data and Planimetric Road Centerline Data

James T. Dietrich (2016) Bathymetric Structure-from-Motion: extracting shallow stream bathymetry from multi-view stereo photogrammetry

Michael E. Hodgson and Patrick Bresnahan (2016) Accuracy of Airborne Lidar-Derived Elevation: Empirical Assessment and Error Budget

Pingbo HU, Bisheng YANG (2020) Visual perception driven 3D building structure representation from airborne laser scanning point cloud

Gerrit Wolken-Möhlmann, Hristo Lilov & Bernhard Lange (2019) Simulation of motion induced measurement errors for wind measurements using LIDAR on floating platforms

Alfredo Peña, Jakob Mann, Nikolas Angelou & Arnhild Jacobsen (2022) Motion-Correction Method for Turbulence Estimates from Floating Lidars

Dong Chen, Liqiang Zhang, P. Takis Mathiopoulos, Senior Member, IEEE, & Xianfeng Huang (2014) A Methodology for Automated Segmentation and Reconstruction of Urban 3-D Buildings from ALS Point Clouds

Andreu Salcedo-Bosch, Francesc Rocadenbosch & Joaquim Sospedra (2022) Enhanced Dual Filter for Floating Wind Lidar Motion Correction: The Impact of Wind and Initial Scan Phase Models

Mateusz Kuprowski & Pawel Drozda (2023) Feature Selection for Airborne LiDAR Point Cloud Classification

Michael E. Hodgson & Patrick Bresnahan (2016) Accuracy of Airborne Lidar-Derived Elevation: Empirical Assessment and Error Budget

Serdar Erol, Emrah Özögel, Ramazan Alper Kuçak & Bihter Erol (2020) Utilizing Airborne LiDAR and UAV Photogrammetry Techniques in Local Geoid Model Determination and Validation

Ruisheng Wang, Jiju Peethambaran & Dong Chen (2017) LiDAR Point Clouds to 3D Urban Models : A Review

Felix Kelberlau & Jakob Mann (2022) Quantification of Motion-Induced Measurement Error on Floating Lidar Systems

Miguel A. Gutiérrez-Antuñano, Jordi Tiana-Alsina, Andreu Salcedo & Francesc Rocadenbosch (2018) Estimation of the Motion-Induced Horizontal-Wind-

Speed Standard Deviation in an Offshore Doppler Lidar

Felix Kelberlau , Vegar Neshaug, Lasse Lønseth, Tania Bracchi & Jakob Mann (2020) Taking the Motion out of Floating Lidar: Turbulence Intensity Estimates with a Continuous-Wave Wind Lidar

J. Gottschall, G. Wolken-Möhlmann , T. Viergutz & B. Lange (2014) Results and conclusions of a floating-lidar offshore test

Dong Chen, Ruisheng Wang & Jiju Peethambaran (2014) Topologically-aware Building Rooftop Reconstruction from Airborne Laser Scanning Point Clouds

J. Gottschall, Brian Gribben, Detlef Stein & Ines Würtu (2017) Floating lidar as an advanced offshore wind speed measurement technique: Current technology status and gap analysis in regard to full maturity

Bowen, Z.H., & R.G. Waltermire (2002) Evaluation of light detection and ranging (lidar) for measuring river corridor topography

Xiong B, Oude Elberink S & Vosselman G. (2014) A graph edit dictionary for correcting errors in roof topology graphs reconstructed from point clouds

S. Oude Elberink & G. Vosselman (2011) “Quality analysis on 3D building models reconstructed from airborne laser scanning data,”

Liu Xiaoye (2008) Airborne LiDAR for DEM generation: Some critical issues

Sánchez Lopera, J & Lerma García, J. L. (2012): “Actualización de cartografía catastral urbana mediante LiDAR y SIG”

Henry Pacheco, Emilio Jarre, José Ricardo Macias, Frank Intriaga, Bolívar Ortega & Edgar Menéndez (2022) Use of Unmanned Aerial Vehicle as an Alternative to Generate Topographic Information)

Fabiola D. Yépez Rincón & D. Fabián Lozano García (2012) Mapeo de ciudades con datos lidar

Harold Alejandro Casallas Torres (2019) Aplicación de la ingeniería topográfica en la planeación, diseño, coordinación y ejecución para el estudio topográfico de la zona rural del municipio de madrid Cundinamarca, mediante tecnología lidar aéreo para el proyecto urbanismo expansión hacienda casablanca

Guangxuan Xu, Yajun Pang, Zhenxu Bai, Yulei Wang & Zhiwei Lu (2021) A Fast Point Clouds Registration Algorithm for Laser Scanners

Andrés Mauricio Castañeda Castañeda & Danna Juliette Castañeda franco (2019) Actualización Catastral en Bogotá con Información Planimétrica y Altimétrica usando Dron con LiDAR

Martin Stroner, Rudolf Urban, Tomáš Reindl, Jan Seidl & Josef Brouček (2020) Evaluation of the Georeferencing Accuracy of a Photogrammetric Model Using a Quadcopter with Onboard GNSS RTK

José Juan Arranz Justel, Santiago Ormeño Villajos & Juan Manuel Vicent García (2018) Algoritmo para la clasificación de nubes de puntos lidar en entornos urbanos: discriminación entre vegetación y edificaciones

Sabina Gómez Garre & M^a Dolores Parra Pedregosa (2013) Comparativa de aplicaciones informáticas destinadas al procesamiento de datos obtenidos con metodología LiDAR aerotransportado y obtención de modelos digitales de elevación

Juan Diego Cock (2000) El Método de la Triangulación aplicado en un escaner laser, para objetos tridimensionales

José Lopera Sánchez (2015) Desarrollo e implementación de algoritmos para clasificar datos LiDAR en áreas urbanas

Fredy Diogenes Sedano Mateo Rufo Wiston & Pari Rendon (2018) “ventajas en los levantamientos topográficos con el uso de vehículos aereos no tripulados (UAV)”

Carlos Alberto Puerta Colorado (2015) Tecnología drone en levantamientos topográficos

M.J. Westoby, J. Brasington, N.F. Glasser , M.J. Hambrey & J.M. Reynolds (2012) ‘Structure-from-Motion’ photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications

Miryam Paola Avella Rodríguez (2022) Análisis comparativo de modelos digitales de terreno obtenidos por tecnología LIDAR con aeronave no tripulada y por fotogrametría con UAV en zona de montaña

Geometría utilizada en nubes de puntos de alta densidad Geometry used in high-density point clouds

Received: 02 02 2024, Accepted: 21 06 2024, Available online: 08 07 2024

David Santiago Ruiz Bazurto
Ingeniería topográfica; Integrante semillero de investigación TOPOCOORS, Facultad de Medio Ambiente y recursos Naturales. Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Bogotá D.C., Colombia. dsruizb@udistrital.edu.co

Pedro José Jácome Ortiz
PhD. Educacion, Msc. Educación, Universidad Javeriana. Esp. Administración total de Calidad, Universidad del Valle Vicerrector Académico Instituto Técnico Simón Rodríguez -INTENALCO -Cali. vicerectoria@intenalco.edu.co
<https://orcid.org/0000-0002-5071-5894>

Nelson Enrique Barrios Jara
PhD. Educacion, Msc. Educación, Universidad Javeriana. Director Grupo de Investigación Foraved. Profesor, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Proyecto curricular de Tecnología en Saneamiento ambiental. nebarriosj@udistrital.edu.co
<https://orcid.org/0000-0003-0815-201X>

Resumen

Este artículo aborda la aplicación de la tecnología LiDAR en la generación de modelos digitales, explorando sus fundamentos, procesos y diversas aplicaciones. LiDAR, una técnica de teledetección óptica basada en pulsos láser, la cual se destaca por su versatilidad, desde la zonificación de riesgos naturales hasta la modelación urbana y la preservación del patrimonio arqueológico. Se examinan las fases de adquisición de datos, el procesamiento de nubes de puntos y los métodos de modelado de las nubes de puntos, incluyendo la triangulación y mallas poligonales, así como los tipos de modelos digitales que se manejan en el mercado. Este artículo ofrece una visión integral de LiDAR, destacando su papel esencial en la obtención y aplicación de datos tridimensionales para una variedad de disciplinas y sectores, además de dar un amplio contexto acerca de los procedimientos necesarios para realizar el modelado geométrico de una nube de puntos.

Palabras clave: *LiDAR, escáner láser, nube de puntos, filtrado, modelado, modelo digital de terreno – DTM, triangulación.*

Abstract

This article addresses the application of LiDAR technology in the generation of digital models, exploring its foundations, processes and various applications. LiDAR, an optical remote sensing technique based on laser pulses, which stands out for its versatility, from the zoning of natural hazards to urban modeling and the preservation of archaeological heritage. It examines the phases of data acquisition, point cloud processing, and point cloud modeling methods, including triangulation and polygon meshes, as well as the types of digital models that are handled in the market. This article provides a comprehensive overview of LiDAR, highlighting its essential role in obtaining and applying three-dimensional data for a variety of disciplines and sectors, as well as providing extensive context on the procedures required to perform geometric modeling of a point cloud. El mismo contenido del resumen en idioma inglés.

Key Words: *LiDAR, laser scanner, point cloud, filtering, modeling, digital terrain model – DTM, triangulation.*

1. Introducción

La revolución tecnológica ha catapultado la capacidad de capturar y analizar nuestro entorno en tres dimensiones, transformando radicalmente la manera en que entendemos y utilizamos la información geoespacial. En este contexto, la tecnología LiDAR emerge como un pilar fundamental en la generación de modelos digitales tridimensionales, ofreciendo una visión detallada y precisa de la topografía y estructuras de nuestro entorno. LiDAR, acrónimo de "Light Detection and Ranging", es una técnica de teledetección óptica que utiliza pulsos láser para obtener mediciones exactas de la superficie terrestre en coordenadas tridimensionales (x, y, z). Desde la zonificación de riesgos naturales hasta la planificación urbana y la preservación del patrimonio arqueológico, la versatilidad de LiDAR abarca diversos campos y aplicaciones.

De manera simplificada, el modelado geométrico con nubes de puntos LiDAR es un proceso que permite capturar datos tridimensionales del entorno, generar modelos digitales del terreno y de superficies, y realizar análisis y visualizaciones detalladas utilizando métodos y técnicas especializadas. Este artículo se sumerge en los fundamentos, procesos y aplicaciones de la tecnología LiDAR, centrándose especialmente en el modelado geométrico de nubes de puntos. A lo largo del artículo, se examinan las fases de adquisición de datos LiDAR, el procesamiento de nubes de puntos, los métodos para el modelado de la nube de puntos, y se exploran diferentes tipos de modelos digitales, como el Modelo Digital de Terreno (MDT) y el Modelo Digital de Superficie (DSM). Finalmente, se discuten diversas aplicaciones en campos tan variados como la climatología, hidrología, geografía, topografía, y más. Este artículo busca proporcionar una visión integral de la tecnología LiDAR y su contribución en la generación de modelos digitales para una amplia gama de aplicaciones.

2. LiDAR

Para entender correctamente el tema del que trata el presente artículo se puede comenzar con la tecnología utilizada para tal fin. Según Esri (s.f.), el LiDAR (de light detection and ranging) es una técnica de teledetección óptica que utiliza la luz de láser para obtener una muestra densa de la superficie de la tierra produciendo mediciones exactas de x, y y z. Esta tecnología puede resultar familiar, pues tal como menciona IBM, funciona bajo el mismo principio que el radar o el sonar. Estas tres tecnologías emiten ondas de energía para detectar y rastrear objetos, de las cuales el LiDAR utiliza ondas de luz reflejada, lo cual

permite medir la distancia más rápidamente y con mayor precisión (IBM, s.f.).

Lo que se conoce actualmente como LiDAR puede interpretarse tanto una técnica para recolección de datos espaciales, así como el sensor que cumple esta función. Esta tecnología requiere de un equipo especializado para su funcionamiento, el cual consiste principalmente en cuatro elementos los cuales, según menciona ACI USA Inc. (s.f.), consisten en: el escáner láser que envía y recibe los pulsos de luz, el sensor que detecta los pulsos reflejados, un GPS incorporado que registra las coordenadas georreferenciadas del punto en el que está ubicado y un sistema inercial que mide la orientación y el movimiento del sistema. De esta manera se obtienen puntos con coordenadas precisas de manera rápida, llegando a emitir hasta 160000 pulsos por segundo.

3. Adquisición de datos LiDAR

Existen diferentes formas de ejecutar un sistema LiDAR, las cuales pueden dividirse en dos tipos principales: el LiDAR aerotransportado, el cual hace uso de un vehículo aéreo, tripulado o no tripulado, para obtener modelos 3D de una zona determinada; y el LiDAR terrestre, el cual se encuentra directamente en el terreno, siendo utilizado para modelos más pequeños o detalles específicos de una zona u objeto. Para ejecutar un sistema LiDAR aerotransportado se hace uso de un escáner láser aerotransportado (ALS), mientras que para el terrestre se hace uso de un escáner láser terrestre (TLS), cuyos términos se determinan de la siguiente manera:

El escáner láser terrestre es un instrumento que permite capturar la geometría y el color de objetos o escenas tridimensionales, mediante la emisión y recepción de pulsos de luz láser. El TLS funciona de la siguiente manera: El escáner láser emite un haz de luz láser infrarroja sobre un espejo giratorio que pinta con luz el entorno circundante (Faro, 2023). Cuando el haz de luz incide sobre un objeto o superficie, parte de la luz se refleja y vuelve al escáner, donde un sensor mide el tiempo que tarda en regresar. Con este dato, se puede calcular la distancia entre el escáner y el punto reflejado, así como su posición angular, gracias a unos codificadores que registran la rotación del espejo y del escáner. De esta forma, se obtienen las coordenadas tridimensionales de cada punto, que se almacenan en un archivo digital, formando una nube de puntos. Además, el escáner láser terrestre cuenta con una o varias cámaras fotográficas, que capturan el color y la textura de los objetos, y las asocian a los puntos correspondientes. Así, se consigue una representación tridimensional del objeto o escena escaneada, con un alto nivel de detalle y precisión. El escáner tiende a instalarse de manera estática sobre un

trípode, aunque también puede utilizarse sobre vehículo en movimiento (Arias & Mesa, 2020). Las aplicaciones comunes para este tipo de LIDAR son la ingeniería, minería, topografía y la arqueología (Esri, s.f.).

De manera similar a este escáner se tiene el ALS, el cual comparte varias de sus características. Este equipo consta de un distanciómetro láser y de un espejo que desvía el haz perpendicularmente a la trayectoria del avión. Este desplazamiento lateral combinado con la trayectoria del avión permite realizar un barrido del terreno. El sistema mide la distancia del sensor al terreno a partir del tiempo que tarda el rayo de luz en alcanzar el suelo y regresar al sensor. Si conocemos las coordenadas y ángulos de actitud del avión y el ángulo del espejo, se pueden calcular a partir de estos datos y de las distancias medidas las coordenadas de los puntos (Ruiz & Kornus, 2003). Una variante del escáner láser aerotransportado es el batimétrico. Esta variante, también conocida como ALB (Airborne LiDAR Bathymetry) funciona por medio de un escáner aerotransportado, con la diferencia de que se utilizan dos tipos de luz láser: verde e infrarrojo. Se selecciona la luz verde para la detección del fondo del mar debido a que es la longitud de onda que penetra las aguas costeras con menor atenuación. La luz infrarroja penetra muy poco, por lo que es utilizada para la detección de la superficie del mar (Guenther et al, 2000). Con esta tecnología se recopilan simultáneamente información de la profundidad del agua y la elevación del terreno, y se proporciona un elevamiento topográfico de la interfaz tierra-agua (Velasco et al, 2014).

El producto entregado por todas estas tecnologías es generalmente una nube de puntos, la cual puede ser definido de la siguiente manera: “la nube de puntos en un conjunto de coordenada XYZ en un sistema de referencia común, que le muestra al espectador una comprensión de la distribución espacial de un objeto en el sitio. También se puede incluir información adicional como un valor de intensidad o un valor RGB”. (Reshetyuk, 2009). Aunque puede realizarse con base en coordenadas arbitrarias, se tiene estandarizado el uso de coordenadas georeferenciadas para poder obtener mayor nivel de precisión. En el caso de requerir de varias nubes de puntos de diferentes escaneos, se deben transformar los conjuntos de datos a partir de sus respectivos sistemas internos hacia un sistema definido externamente (Falip, 2009), el cual es generalmente el utilizado por las antenas GNSS (WGS 1984) o un sistema de referencia estandarizado en el país. De esta manera se obtiene como producto inicial una nube de puntos georeferenciada, con la cual se pueden generar distintos modelos para satisfacer una gran cantidad de aplicaciones.

A la hora de generar este producto se deben tener en cuenta ciertos parámetros de calidad, entre los cuales se pueden destacar los mencionados por Lorite et al. (2015), en donde se debe asegurar que la nube de puntos generada debe cumplir con las especificaciones técnicas de cada fase

con la que cuente el proyecto. Se debe comprobar que la nube de puntos cumpla con los requerimientos de densidad de puntos, recubrimientos transversales, área cubierta, resolución espacial, entre otros.

4. Procesamiento de nubes de puntos LiDAR

Las nubes de puntos LiDAR deben pasar por distintas etapas de procesamiento conforme a la finalidad que se le desee dar. Uno de los primeros procesos a realizar es la depuración de los puntos erróneos, los cuales no se encuentran ubicados acordes al terreno, teniendo valores de norte, este o cota exagerados, por lo cual tienden a encontrarse a simple vista. Arranz (2013) describe estos puntos como errores groseros, en los que se consideran puntos aéreos erróneos, puntos redundantes, puntos errores multi-camino y puntos sobre objetos móviles. Se deben eliminar estos puntos, pues al ser procesados generan errores con forma de picos o líneas. Esta fase no va directamente relacionada con la filtración del ruido de la nube de puntos, aunque puede realizarse simultáneamente. Una de las maneras de realizar esta depuración puede ser la definida por Arranz, Ormeño y Vicent (2012), quienes plantean que un parámetro para determinar estos errores puede basarse en la diferencia de cota que tenga el punto con respecto a los demás de su entorno, con lo cual, si se nota que se encuentra por encima de un umbral determinado, se considera como un error y puede ser eliminado de la nube de puntos.

Una vez realizada esta operación se procede a clasificar la nube de puntos. Albacete (2011), refiere que “la clasificación consiste en asignar atributos a los puntos registrados por el sistema LIDAR. Es decir, una vez obtenida la nube de puntos se puede definir como clasificación a la función que a cada retorno se le asigna un atributo o categoría”. Esta fase puede llegar a ser una de las más largas, por lo que se han implementando una gran cantidad de algoritmos con el propósito de realizar el proceso de manera automática, sin embargo, como menciona Vega (2021), no se tiene actualmente ningún algoritmo capaz de realizar el proceso en su totalidad, por lo que se enfatiza en que, a pesar de la utilidad y eficiencia que se puede obtener por medio de la clasificación automática, para obtener un mayor nivel de precisión se debe complementar con una clasificación manual posterior. La clasificación de la nube de puntos va acorde a ciertos atributos, los cuales se asignan en función de lo que se encuentre en el terreno. Los más comunes son el suelo, la vegetación, las edificaciones, las vías y el ruido en general. El estándar que se encuentra en la mayoría de programas es la de la Sociedad Estadounidense de Fotogrametría y Detección Remota (ASPRS, por sus siglas en inglés), la cual define la clasificación mediante las siguientes clases:

VALOR	DESCRIPCION
0	Creado, nunca clasificado
1	Sin clasificar
2	Suelo
3	Vegetación Baja
4	Vegetación Media
5	Vegetación Alta
6	Edificios
7	Puntos bajos (ruido)
8	Punto clave del modelo (punto de masa)
9	Agua
10	Vía de tren
11	Vía
12	Puntos solapados
13	Alambre de protección
14	Alambre de conductor fase
15	Torre de transmisión
16	Alambre conector de estructura
17	Puente
18	Puntos altos (ruido)
19	Estructura aérea
20	Terreno ignorado
21	Nieve
22-39	Reservado para la ASPRS
40	Punto batimétrico
42	Superficie de agua
43	Superficie derivada de agua
43	Objeto sumergido
44	Objetos IOH S-57
45	Sin fondo en el punto batimétrico
46-255	Reservado para la ASPRS

Ilustración 1: Clasificación de nubes de puntos LiDAR según ASPRS.
Recuperado de Vega (2021).

La clasificación puede dividirse en dos fases, mencionadas por Porras, Cáceres y Gallo (2013) como segmentación y selección y extracción. La segmentación consiste en el proceso en el que se les dan etiquetas a ciertas zonas manualmente para ser clasificadas con una misma clase, agrupando la nube en objetos específicos. La segmentación puede realizarse de distintas maneras, teniendo en cuenta las zonas que tengan propiedades geométricas similares, características como intensidad, altura o información espectral, en la detección de formas específicas o bordes, áreas o volúmenes específicos, entre otros. La selección y extracción consiste en la elección de los atributos más relevantes de la nube de puntos con el fin de seleccionar los puntos más importantes de la nube de puntos, ya sea con el fin de filtrar la información relevante para el trabajo que se esté realizando, o también para resaltar estos puntos por encima del resto de la nube de puntos.

Como resultado de la clasificación se tiene una nube de puntos agrupada por distintas clases que representan los objetos que se desea representar o aquellos que se desea omitir. El siguiente procedimiento consiste en la filtración de los puntos que se desea utilizar. Como se menciona anteriormente, se pueden extraer clases con distintas

características para satisfacer una función específica, sin embargo, a diferencia de la selección y extracción, en este punto se busca utilizar solamente las clases filtradas. Un buen ejemplo de esto es un concepto que se detallará más adelante, el de un modelo digital de elevación (MDE), en el cual se requiere únicamente de los puntos correspondientes al nivel del suelo para generar el modelo, pues es el único atributo que se requiere delimitar.

5. Métodos para realizar el modelado de la nube de puntos LiDAR

Para generar un modelo digital de elevación, se debe contar con una estructura que evite que se generen huecos en la nube de puntos. Esta estructura es uno de los puntos más relevantes para este trabajo, pues es con base en ésta que se puede realizar el modelado de la nube de puntos. Los métodos más comunes para la realización de modelos digitales son la triangulación, las mallas poligonales y los modelos de superficie.

Aunque estos son los métodos más convencionales, existen otros métodos que se pueden utilizar para este fin. Una de las formas más comunes de clasificar el enfoque del modelado según la estructura generada es la triangulación. Esta consiste en conectar los puntos de la nube mediante segmentos de recta para formar triángulos, que son los elementos básicos de una superficie poligonal. Existen varios algoritmos para realizar la triangulación de una nube de puntos, como los derivados de Delaunay o Voronoi. Esri (s.f.) define a la triangulación de Delaunay como “Una técnica para crear una malla de triángulos contiguos y no superpuestos a partir de un dataset de puntos. Cada círculo al que se circunscribe el triángulo no contiene ningún punto del dataset en su interior.” El algoritmo de esta triangulación se basa en el establecimiento de unos puntos ajenos a la nube de puntos dato y externos a esta (puntos ficticios), marcando los límites de actuación. Estos puntos generarán triángulos con los puntos exteriores de la nube por los cuatro costados (norte, sur, este y oeste), de tal manera, que se genera una superficie total siempre convexa. Utilizando esta información, se podrían determinar qué puntos están unidos con estos puntos ficticios y utilizar los lados de los triángulos generados con estos para la formación del límite exterior de la nube de puntos. El proceso es rápido y sencillo y no implica el cálculo de toda la triangulación de la nube de puntos (Arranz, 2012). Con un comportamiento similar existe el algoritmo de Voronoi, el cual funciona con base en los diagramas de Voronoi, definidos por Polanco (2020) como la división de un espacio en regiones, de forma que a cada punto de una nube de puntos se le asigna la región del espacio cuya distancia es la menor a cualquier otro punto. De esta forma, las zonas cuya distancia es equidistante entre dos o más puntos son los límites de los polígonos que se forman en la nube de

puntos. La triangulación de Voronoi tiene algunas limitaciones o desventajas, como que puede ser sensible al ruido o a la distribución de los puntos, que puede generar regiones muy grandes o muy pequeñas, que puede requerir de mucho tiempo de cómputo o de memoria para su construcción o visualización, y que puede no ser adecuada para representar superficies curvas o complejas (Villatoro, 2017).

Existe también un método denominado malla poligonal, el cual Cano (2015) describe como una representación poligonal de una forma modeladas como muchas superficies planas, generalmente utilizando triángulos como polígonos para este fin. Una malla poligonal es un conjunto de caras representadas como polígonos, de forma que las intersecciones entre caras forman o bien una arista, o bien un vértice, y que la unión de todas las caras o polígonos forma una superficie continua. De esta forma es posible representar cualquier superficie como un conjunto de polígonos conectados entre sí, con el único requerimiento de que localmente formen una superficie conectada, única y coherente, es decir, evitando puntos donde coinciden más de una superficie, vértices aislados o aristas compartidas por más de dos polígonos (Hernández, 2019). Como se menciona en España et al. (2008), las nubes de puntos se procesan mediante mallas de triángulos con el objetivo de compensar los errores debidos a no tener una línea de visión clara o demasiado alejada del objeto a escanear. A partir de esto, puede deducirse que la malla poligonal consiste en una triangulación de manera masiva con el fin de generar un modelo lo más similar posible a una zona u objeto con base en polígonos. Sin embargo, las mallas poligonales no pueden realizarse únicamente con triángulos. Otros métodos para realizar las mallas poligonales son por medio de cuadriláteros estructurados o cuadriláteros no estructurados (Hernández, 2019). Dentro de las mallas por medio de cuadriláteros estructurados se pueden mencionar las mallas hechas a partir de una grilla (grid), en las que los puntos se sitúan de manera regulada y la elevación se asigna a un área o píxel por medio de métodos de interpolación (Extremera, 2019). Discretizar el espacio a una resolución da lugar a que la celda esté ocupada por varios o por ningún punto, por lo que el modelo puede resultar inconsistente en distintas partes, por lo que no tiende a ser un método poco utilizado.

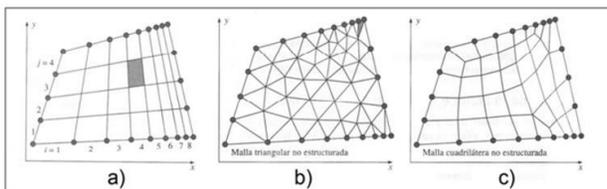


Ilustración 2: Tipos de mallas poligonales. Fuente: Hernández (2019).

Si bien se obtiene un buen nivel de precisión obtenido a partir de las mallas poligonales, éstas pueden no ser del todo cómodas al tener una forma tan rugosa o interrumpida. Un método con el que se pueden suavizar estos errores son los modelos de superficie, mencionados por Cano (2015), los cuales utilizan algoritmos de interpolación sobre la malla poligonal con el fin de generar curvas que hagan del modelo algo más sofisticado y similar a la realidad. Estas superficies tienen el beneficio de ser más ligeras y cómodas, por lo que son ideales para representar obras arquitectónicas o artísticas. Por el contrario, pueden resultar un poco menos precisas si se requiere del uso de puntos de control o de coordenadas precisas de una zona determinada, pues estos datos pueden llegar a perderse con la interpolación a partir de curvas, aunque en algunos casos esta diferencia puede considerarse despreciable.

6. Tipos de modelos digitales

La modelización del terreno resulta de vital importancia en multitud de áreas como la climatología o la hidrología entre otras, siendo en muchas ocasiones uno de los factores determinantes de la calidad de sus estudios (Brótons, et al., 2010).

Una acepción de la palabra modelo, originada en ámbitos geográficos, lo define como una representación simplificada de la realidad en la que aparecen algunas de sus propiedades (Joly, 1988). De la definición se deduce que la versión de la realidad que se realiza a través de un modelo pretende reproducir solamente algunas propiedades del objeto o sistema original que, por lo tanto, se ve representado por otro objeto de menor complejidad, por lo que se puede deducir que el modelo de un terreno busca ser una representación parcial de un área determinada.

La denominación MDT (modelo digital de terreno) es la genérica para todos los modelos digitales, incluyendo los DEM (modelo digital de elevación), en los cuales la coordenada Z se refiere siempre a la elevación sobre el terreno y a los demás tipos de modelos en los que la Z puede ser cualquier variable (profundidad de suelo, número de habitantes...) (IGAC, 2010). Puede definirse al MDT como un conjunto de datos numéricos que describe la distribución espacial de una característica del terreno (Felicísimo, 1994). Existen algunas variantes del DTM acorde a las cualidades que se desean conservar, así como el ya mencionado DEM. El modelo digital de terreno es, a grandes rasgos, un sinónimo del modelo digital de elevación, aunque en algunos contextos pueden encontrarse diferencias. Otro tipo de modelo bastante utilizado es el modelo digital de superficie (DSM – MDS), el cual consiste en una variante del MDT en el cual se incluye la mayor cantidad de información posible recibida por el sensor LiDAR. El PNOA (s.f.) lo define de manera

simplificada como “un modelo digital con obstáculos, en el que se representa la superficie más elevada sobre el terreno, sea de origen natural o artificial”. Mientras que el DEM define solamente los puntos más bajos de la nube de puntos para generar su modelo, el DSM es definido a partir de todos los objetos que se encuentran en él, incluidos los edificios, puentes, vegetación, etc (Esri, s.f.).

7. Aplicaciones

Las aplicaciones que tienen los modelos digitales generados a partir de nubes de puntos LiDAR abarcan una gran cantidad de áreas y disciplinas, de manera que se plantean algunos ejemplos específicos sobre la manera en la que se pueden aprovechar estos recursos: En la zonificación de riesgos, Crespo, Menéndez y Fernández (2012) emplean un modelo digital de terreno para describir áreas con distintas frecuencias de inundación, destacando su utilidad en la gestión de desastres naturales. Yero, Álvarez y Pérez (2023) amplían las aplicaciones, señalando su relevancia en la planificación urbana, administración de redes eléctricas y desarrollo catastral. Además, en Batty et al. (2000), se presenta un análisis exhaustivo del estado del arte y la implementación de modelos digitales para el diseño de ciudades virtuales. En el campo de la arqueología, Moralejo et al. (2022) ejemplifican el uso de Modelos Digitales de Terreno (MDT) generados con LiDAR para el estudio de sitios históricos como El Shincal de Quimivil. Este enfoque avanzado preserva y revela detalles significativos del patrimonio cultural. En el ámbito medioambiental, González (2012) utiliza MDT para determinar parámetros dosimétricos en Galicia, contribuyendo a la gestión sostenible de recursos. En Montealegre, Lamelas y De la Riva (2014), se refuerza esta idea, pues se señala la importancia de la calidad de los DTM para la normalización de las áreas de vegetación. Collado (2017) aplica estos modelos para estudios detallados de análisis y variación del paisaje, aportando a la comprensión de cambios ambientales a lo largo del tiempo. Cano (2015) resalta también las aplicaciones que se pueden dar en la industria, pudiendo ser utilizados para modelar componentes industriales para su diseño o control de calidad. Además de esto, se puede encontrar otras aplicaciones orientadas a la geografía o a la topografía. Palacio, López & Ortiz (1991) utilizan esta tecnología para conocer acerca de las formaciones geomorfológicas, mientras que Ramírez (2002), destaca la facilidad que ofrecen los MDT para la delimitación de drenajes naturales y sus respectivas cuencas hidrográficas.

8. Conclusiones

En conclusión, la aplicación de la tecnología LiDAR para la generación de modelos digitales se destaca por su versatilidad en diversas disciplinas, desde la zonificación de riesgos naturales hasta la preservación del patrimonio arqueológico y la planificación urbana. En el proceso de adquisición de datos LiDAR, tanto aerotransportado como terrestre, se utilizan escáneres láser especializados que emiten pulsos de luz para obtener nubes de puntos tridimensionales georreferenciadas. El procesamiento de estas nubes de puntos implica la depuración, clasificación y filtración, asegurando la calidad y precisión de los datos.

La tecnología LiDAR se vislumbra como un componente clave para el futuro de la generación de modelos digitales en diversas aplicaciones. Su capacidad para proporcionar datos tridimensionales precisos y detallados ofrece oportunidades significativas para avances en disciplinas como la climatología, hidrología, arqueología, y más. En el futuro de esta tecnología, se vislumbra una mayor automatización y eficiencia en todos los aspectos del proceso, desde la adquisición hasta el modelado final. La integración de algoritmos más avanzados, respaldados por técnicas de clasificación manual, promete una evolución significativa en la precisión y rapidez de la generación de modelos. La continua evolución de esta tecnología promete contribuir aún más a la comprensión y gestión de nuestro entorno.

Referencias

- ACI USA Inc. (s.f.). Guía completa de topografía LIDAR. Recuperado de: <https://acicorporation.com/espanol/guia-completa-de-topografia-lidar/>
- Arias, L. E. & Mesa, J. L. (2020). Metodología para generación de Modelos Digitales De Terreno Topobtimétricos a partir de integración de datos de sensores remotos LiDAR aéreo, Ecosonda Monohaz y Topografía Convencional usando herramientas SIG. *Universidad Antonio Nariño*. Recuperado de: <http://repositorio.uan.edu.co/bitstream/123456789/2145/2/2020LuisEnriqueAriasMart%c3%adnez.pdf>
- Arranz Justel, J. J., Ormeño Villajos, S., & Vicent García, J. M. (2012). Algoritmo para la clasificación de nubes de puntos LiDAR en entornos urbanos: discriminación entre vegetación y edificaciones. Recuperado de: <https://oa.upm.es/21209/>
- Arranz, J. J. (2013). Diseño, optimización y análisis de sistemas basados en técnicas láser, para el modelado geométrico, registro y documentación, aplicados a entidades de interés patrimonial. *Escuela Técnica Superior de Ingenieros en Topografía, Geodesia y Cartografía*. Recuperado de: https://oa.upm.es/15056/1/JOSE_JUAN_ARRANZ_JUSTEL_B.pdf
- Batty, M., Chapman, D., Evans, S., Haklay, M., Kueppers, S., Shiode, N., ... & Torrens, P. M. (2000). Centre for Advanced Spatial Analysis University College London 1-19 Torrington Place Gower Street London WC1E 6BT. Recuperado de: <https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/30656886/paper26->

libre.pdf?1391774902=&response-content-disposition=inline%3B+filename%3DVisualising_the_city_communicating_urban.pdf&Expires=1700200370&Signature=X7mS~yfyJSPJdtZgzRon0puBppFfx5TWICEZ5O6RafBFuRyjOfw4LmrdYchQ0xoW0UdjNxxQGRA--8W5F447bEI1eHo2WqwUmDpc3x3m5dE~544KTdEKfi-uZXBorJq8m7QVA8LjIK35mYBYASnZcZbWjE3~QvdDOMWXeMgeyhIODJ0OrN~Bhl4OM6EDZGIP2c9SryPNbDbDGLdLQmEfYZJKnPy6vyF7czzu~ojOdwBkgdxAlUwfoNMfZ0~xiqG6Td53c6DOWslUnxJQ99V9RoM~Jj6m6sPVgbVFSWRLKeVK8yTXPipql2GtaEF-5kLKhIE4VPfRn5RhfoW3~jEX~Kg__&Key-Pair-Id=APKAJLOHF5GGSLRBV4ZA

Cano, R. A. (2015). Técnicas y herramientas de procesamiento de nubes de puntos tridimensionales. *Universidad Carlos III de Madrid*. Recuperado de: https://e-archivo.uc3m.es/bitstream/handle/10016/22336/PFC_Ruben_Artes_Cano.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Collado Latorre, J. C. (2017). Aplicación de la tecnología LiDAR en el análisis visual de la valoración del paisaje. *Universitat Politècnica de València*. Recuperado de: <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/86221/COLLADO%20-%20APLICACION%20DE%20LA%20TECNOLOGIA%20CDA%20LiDAR%20EN%20EL%20ANALISIS%20VISUAL%20DE%20LA%20VALORACION%20DEL%20PAISAJE.pdf?jsessionid=DC4BE0D03D4CB854FAB1081FC34FBAB9?sequence=1>

Crespo, J., Menéndez, R., & Fernández, E. (2012). Aplicación de modelos digitales del terreno generados a partir de tecnología LIDAR en la caracterización de zonas inundables. *Avances de la Geomorfología en España 2010-2012. XII Reunión Nacional de Geomorfología*, 267-271. Recuperado de: https://www.researchgate.net/profile/Elena-Fernandez-Iglesias/publication/336640382_Aplicacion_de_Modelos_Digitales_del_Terreno_generados_a_partir_de_tecnologia_LIDAR_en_la_caracterizacion_de_zonas_inundables/links/5da96d7b92851c577eb81b00/Aplicacion-de-Modelos-Digitales-del-Terreno-generados-a-partir-de-tecnologia-LIDAR-en-la-caracterizacion-de-zonas-inundables.pdf

España, M., Moreno, J. J., Martín, D. & Cano, P. (2008). Herramientas para la triangulación y registro de modelos 3D a partir de nubes de puntos. *Grupo de Investigación en Informática Gráfica. Departamento de Lenguajes y Sistemas Informáticos. Universidad de Granada*. Recuperado de: <https://diglib.org/bitstream/handle/10.2312/LocalChapterEvents.CEIG.CEIG08.261-264/261-264.pdf?sequence=1>

Esri (s.f.). ¿Qué son los datos LIDAR? *ArcGIS Desktop*. <https://desktop.arcgis.com/es/arcmap/latest/manage-data/las-dataset/what-is-lidar-data-.htm#:~:text=El%20LIDAR%20%28light%20detection%20and%20ranging%29%20es%20una,que%20se%20pueden%20visualizar%20y%20analizar%20usando%20ArcGIS>.

Esri (s.f.). Administrar datos de elevación, parte 1: Acerca de los datos de elevación. *ArcGIS Desktop*. Recuperado de: <https://desktop.arcgis.com/es/arcmap/latest/manage-data/raster-and-images/wkflw-elevation-part1.html>

Esri (s.f.). Tipos de LIDAR. *ArcGIS Desktop*. Recuperado de: <https://desktop.arcgis.com/es/arcmap/latest/manage-data/las-dataset/types-of-lidar.html>

Esri (s.f.). Triangulación de Delaunay. *Diccionario SIG de Esri Support*. Recuperado de: <https://support.esri.com/es-es/gis-dictionary/delaunay-triangulation>

Extremera, J. (2019). Generación de modelos digitales de terreno y de superficies a partir de información capturada por sensores LiDAR aerotransportados. *Universidad de Jaén*. Recuperado de: https://crea.ujaen.es/bitstream/10953.1/14255/1/MEMORIA_TFG.pdf

Falip, S. (2015). Agrimensura 3D con tecnología LiDAR. *Universidad Nacional de La Plata*. Recuperado de: http://sedici.unlp.edu.ar/bitstream/handle/10915/77136/Documento_completo.pdf-PDFA.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Faro (2023). Comprender los escáneres láser. Recuperado de: <https://www.faro.com/es-MX/Resource-Library/Article/understanding-laser-scanners>

Felicísimo, Á. M. (1994). Modelos digitales del terreno. *Oviedo: Pentalfa*. Recuperado de: <https://www.thedigitalmap.com/EasyDEM/ayuda/html/documentos/libroMDTFelicisimo.pdf>

González Ferreiro, E. (2012). Aplicación de LiDAR aerotransportado en la generación de modelos digitales del terreno y en la estimación de variables dasométricas. Recuperado de: <https://investigacion.usc.gal/documentos/5d1df67629995204f766ca6d>

Guenther, G. C. & Grant, A. G. & LaRocque, P. E. & Reid, D. J. (2000). Meeting the accuracy challenge in Airborne LiDAR Bathymetry. *NOAA, National Ocean Service*. Recuperado de: <https://web.archive.org/web/20160304225500/http://www.fugro-pelagos.com/lidar/lib/papers/MeetingAccuracyChallenge.pdf>

Hernández, J. M. (2019). Tratamiento de nubes de puntos mediante herramientas CAD. *Universidad de Valladolid*. Recuperado de: <https://uvadoc.uva.es/bitstream/10324/36750/1/TFG-I-11116.pdf>

IBM (s.f.). ¿Qué es LiDAR? <https://www.ibm.com/es-es/topics/lidar>

IGAC. (2010). Generación del Modelo Digital de Terreno – DTM. *Manual de procedimientos*. Recuperado de: https://www.igac.gov.co/sites/igac.gov.co/files/listadomaestro/p30400-02-10v2_generacion_del_modelo_digital_de_terreno_-_dtm.pdf

Joly, F. (1988): La cartografía. Oikos-Tau. Barcelona.

Lorite, S. M. & Ojeda, J. C. & Rodríguez-Cuenca, B. & González, E. & Muñoz, P. (2015). Procesado y distribución de nubes de puntos en el proyecto PNOA-LiDAR. *Instituto Geográfico Nacional, Madrid*. Recuperado de:

- https://pnoa.ign.es/resources/archivos/pdf/Procesado_distribucion_nubes_puntos_proyecto_PNOA-LiDAR.pdf
- Montealegre, A. L., Lamelas, M. T. & De la Riva, J. (2014). Evaluación de métodos de interpolación utilizados en la creación de modelos digitales de elevaciones para la normalización de la nube de puntos LIDAR-PNOA en aplicaciones forestales. *Departamento de Geografía y O.T., Universidad de Zaragoza*. Recuperado de: https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/46429/1/2014_Montealegre_et_al_Congreso-TIG.pdf
- Moralejo, R. A., López, L., Gobbo, J. D., & del Cogliano, D. H. (2022). Análisis comparativo de modelos digitales del terreno obtenidos con LiDAR aéreo y *structure from motion*: aplicación en estudios del paisaje en el sitio inka El Shincal de Quimivil (Noroeste argentino). Recuperado de: https://ri.conicet.gov.ar/bitstream/handle/11336/216948/CONICET_Digital_Nro.c64a6ed2-defd-4024-9ad9-4090b9be0179_B.pdf?sequence=2&isAllowed=y
- Moreno Brotóns, J., Alonso Sarría, F., Gomariz Castillo, F. y Alonso Bernardo, D. (2010): Análisis y validación de modelos digitales de elevaciones mediante datos LIDAR. En: Ojeda, J., Pita, M.F. y Vallejo, I. (Eds.), *Tecnologías de la Información Geográfica: La Información Geográfica al servicio de los ciudadanos. Secretariado de Publicaciones de la Universidad de Sevilla*. Sevilla. Pp. 254-271. ISBN: 978-84-472-1294-1.
- Palacio Prieto, J. L., López Blanco, J., & Ortiz Pérez, M. A. (1991). Evaluación geomorfológica estructural a través de modelos sombreados y pares estereoscópicos generados a partir de modelos digitales de terreno. *Investigaciones geográficas*, (23), 89-101. Recuperado de: <https://www.scielo.org.mx/pdf/igeo/n23/n23a5.pdf>
- PNOA (s.f.). Modelo digital de superficies (DMS). Recuperado de: <https://pnoa.ign.es/pnoa-lidar/modelo-digital-de-superficies>
- Polanco Gallego, P. R. (2020): Algoritmo para la paralelización en GPU de diagramas de Voronoi. *Universidad de Chile*. Recuperado de: <https://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/179076/Algoritmo-para-la-paralelizacion-en-GPU-de-diagramas-de-Voronoi.pdf?sequence=1>
- Porrás Díaz, H. & Cáceres Jiménez, J. J. & Gallo Lancheros, E. O. (2013). Modelos urbanos tridimensionales generados a partir de nubes de puntos de un escáner láser terrestre. *Universidad Industrial de Santander*. Recuperado de: <https://revistas.udistrital.edu.co/index.php/Tecnura/article/view/7028/8709>
- Ramírez Osorio, J. M. (2002). Extracción automática de redes de drenaje a partir de modelos digitales de terreno. *Universidad Nacional de Colombia*. Recuperado de: http://aqua.upc.es/crahi/ftp_homes/corral/crahi/docus/Extraccion%20Automatica%20de%20Redes%20de%20Drenaje.pdf
- Reshetnyuk, Y. (2009). Self-calibration and direct georeferencing in terrestrial laser scanning. *Royal Institute of Technology – KTH. Estocolmo, Suecia*.
- Ruiz, A., & Kornus, W. (2003). Experiencias y aplicaciones del LiDAR. V Semana Geomática de Barcelona, 11(03).
- San José Albacete, A. (2011). Procesamiento de datos LiDAR con ArcGIS Desktop 10.
- Vega, J. C. (2021). Generación de una metodología para el procesamiento de nubes de puntos LIDAR mediante el uso de vehículos aéreos no tripulados, UAV, en el campus ESPE, SANGOLOQUÍ. *Universidad de las Fuerzas Armadas*. Recuperado de: <https://repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/25967/1/T-ESPE-044801.pdf>
- Velasco, J. & Molina, I. & Martínez, E. & Arquero, Á. & Prieto, J. F. (2014). Sea Bottom Classification by Means of Bathymetric LIDAR Data. Recuperado de: https://oa.upm.es/33100/1/INVE_MEM_2014_154928.pdf
- Villatoro, F. R. (2017). Visualizar el fútbol con triangulaciones de Delaunay y diagramas de Voronoi. *La ciencia de la mula Francis*. Recuperado de: <https://francis.naukas.com/2017/03/15/diagramas-de-voronoi-en-el-futbol/>
- Yero Cabrales, Y., Álvarez Romero, A., & Pérez García, J. C. (2023). Empleo de nubes de puntos LiDAR para la obtención de modelos digitales del terreno y otros productos. *Revista Cubana De Geomática*, 2(1). Recuperado de: <https://geomatica.geocuba.cu/rcg/article/view/67>

Sensores remotos pasivos y su utilidad en Drones Passive remote sensors and their usefulness in drones

Received: 02 02 2024, Accepted: 21 06 2024, Available online: 08 07 2024

Ingeniería topográfica; Integrante semillero de investigación TOPOCOORS, Facultad de Medio Ambiente y recursos Naturales. Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Bogotá D.C., Colombia. anfvegap@udistrital.edu.co

Andrés Felipe Vega Porras

PhD. Educación. Msc. Educación, Docente Secretaria de Educación del Caquetá
Investigador grupo de Investigación Foraved, Secretaria Educación del Caquetá, campohermoso12@hotmail.com
<https://orcid.org/0000-0002-1618-7813>

Wilber Ortiz Navarrete

PhD. Gerencia y Política Educativa. Msc. Educación, Esp. Educación y Orientación Familiar.
Investigador grupo de Investigación Foraved. Luisgomezmerchan@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0001-5838-9037>

Luis Gómez Merchan

Resumen

La utilización de sensores remotos para el estudio de coberturas e investigaciones con énfasis en suelos ha tomado relevancia en los últimos años, esto debido a la implementación de tecnologías que permiten el muestreo y análisis de áreas de gran amplitud, minimizando los esfuerzos y costos derivados de la realización de un trabajo en campo, estas tecnologías se basan en la utilización de sensores con diversas fuentes de emisión de energía que permiten mediante plataformas aéreas capturar información en terreno, es por estas ventajas que dichas técnicas se han popularizado, de tal forma que hoy se existe una amplia variedad de entidades que permiten la difusión y el tratamiento de los datos capturados por sus sensores, tales como Sentinel, Landsat, Alos Palsar, SAOCOM, etc. Que adicionalmente han diversificado los servicios que ofrecen y cuentan con plataformas integradas para una amplia diversidad de aplicaciones, tales como sensores Ópticos, RADAR, LiDar y sus derivados.

La diversidad de aplicaciones que tiene esta técnica le ha otorgado un papel principal en el desarrollo e investigación en ciencias de la tierra, siendo un pilar para expertos en áreas como la geología, la topografía, la agronomía, agrología, etc. Y que adicionalmente presenta una ventaja económica para las entidades que requieren de estudios de gran porte minimizando costos y tiempos de operación. Es necesario resaltar que a pesar de tratarse de un trabajo cuya intervención en el terreno es mínima, debe existir un reconocimiento de la respuesta de los objetos analizados ante una serie de estímulos físicos, en aras de realizar un estudio exitoso y preciso.

Palabras clave: *Sensores Remotos, Coberturas, Terreno, RADAR, teledetección, plataformas aéreas.*

Abstract

The use of remote sensors for the study of land cover and research with emphasis on soil components has become relevant in recent years, due to the implementation of technologies that allow the sampling and analysis of large areas, minimizing the efforts and costs derived from field work, These technologies are based on the use of sensors with various sources of energy emission that allow through aerial platforms to capture information on the ground, it is for these advantages that these techniques have become popular, so that today there is a wide variety of entities that allow the dissemination and processing of data captured by its sensors, such as Sentinel, Landsat, Alos Palsar, SAOCOM, etc.. They have also diversified the services they offer and have integrated platforms for a wide variety of applications, such as RADAR, Optical and LiDar.

The diversity of applications of this technique has given it a leading role in the development and research in earth sciences, being a mainstay for experts in areas such as geology, topography, agronomy, agrology, etc. It also presents an economic advantage for entities that require large studies, minimizing costs and operation times. It is necessary to emphasize that despite being a work whose intervention in the field is minimal, there must be a recognition of the response of the analyzed objects before a series of physical stimuli, to conduct a successful and precise study.

Key Words: *Remote Sensing, Coverages, Terrain, RADAR, Remote Sensing, Aerial Platforms.*

1. Introducción

La teledetección, en su esencia, se caracteriza por la capacidad de obtener información de un objeto o fenómeno sin necesidad de un contacto directo con él (Jensen & Lulla, 2008). Los análisis derivados de esta técnica se fundamentan en principios físicos que hacen hincapié en los fenómenos de incidencia, dispersión y refracción de la luz. En este proceso, se concentra en la respuesta de los objetos a una serie de haces con diversas frecuencias que el sensor dirige hacia ellos. Así, se lleva a cabo un análisis exhaustivo que abarca una amplia variedad de rangos del espectro de luz. A través de técnicas de falso color, la información de los niveles radiométricos capturados por cada imagen espectral se superpone, dando lugar a imágenes multispectrales e hiperespectrales.

Estas imágenes no solo son visualmente impactantes, sino que también posibilitan realizar estimaciones y análisis complejos sobre la composición del suelo. Desde análisis multitemporales hasta la evaluación del estado de cobertura, biomasa activa y diversas aplicaciones en campos como la geología, ingeniería, agrología y gestión de riesgos, la teledetección ha demostrado ser una herramienta versátil y esencial.

El avance en los métodos de adquisición no solo se ha traducido en la expansión de los rangos del espectro electromagnético para captar información. También se ha experimentado un notable desarrollo en las tecnologías de las plataformas que transportan los sensores. En sus inicios, esta tecnología estaba asociada exclusivamente a plataformas satelitales, vinculando los procedimientos a condiciones adversas como la climatología, la densidad de nubes y los gases disueltos en la atmósfera. La disponibilidad de información estaba limitada por la resolución temporal y la órbita del satélite (geoestacionaria, polares).

No obstante, en la actualidad, se ha superado gran parte de estas limitaciones gracias a la integración de drones. Este avance ha eliminado las barreras de acceso a estas tecnologías al permitir la adquisición de información in situ. De esta manera, se ha ampliado significativamente la flexibilidad y la eficacia de la teledetección, convirtiéndola en una herramienta más accesible y poderosa para una variedad de aplicaciones científicas y prácticas.

2. Funcionamiento imágenes SAR

RADAR cuyas siglas traducen Radio Detection and Ranging son sensores activos que emiten ondas de energía en el espectro electromagnético con un rango de trabajo de 1 cm a 100 cm es decir en el intervalo de microondas, por lo que cuenta con una amplia variedad de ventajas con respecto a las imágenes ópticas, tales como las condiciones

atmosféricas, las cuales no tienen afectación en las imágenes radar.

El funcionamiento esquemático del sensor de radar tiene en cuenta una geometría completa de observación en direcciones perpendiculares y paralelas al movimiento conocidas como (along track y across track) y que generan imágenes mediante la captura de ecos en función del tiempo, existen diversos métodos de adquisición dependiendo del sensor y la finalidad es posible distinguir adquisiciones del modo STRIPMAP en la que el RADAR toma datos de un solo Swath, adquisición SPOTLIGHT en la que el RADAR observa un único blanco, por lo que debe reorientar la antena durante la adquisición, adquisición SCANSAR en la que el radar distribuye los pulsos en varias líneas de paso, adquisición TOPSAR en la que el RADAR distribuye pulsos entre varios swaths modificando el azimut para iluminar de forma homogénea. La construcción de una imagen radar es un mapa de reflectividad, es decir que es posible distinguir la cantidad de energía que volvió al sensor con un análisis óptico de la misma, una imagen SAR cuenta con zonas de alta y baja reflectividad, por lo que es posible distinguir zonas de alto contraste con gran presencia de tonalidades blancas y negras, esto es un indicador de la energía retrodispersada en el terreno, análisis que depende de la energía y la conductividad de las coberturas, la interpretación visual también realiza distinciones según el tono y la textura. Ecuación 1 Coeficiente de retrodispersión.

$$\sigma^0 = \frac{\sigma}{A}$$

La ecuación 1 corresponde con el coeficiente de retrodispersión, elemento que determina la cantidad de energía que retorna al radar.

Donde σ es el coeficiente de retrodispersión y A es la unidad de área



Ilustración 1 (Interacciones con el blanco) Imagen procesada SAR Sentinel 1. Fuente: Autor

La ilustración 1 muestra una imagen SAR del servicio Sentinel 1 en Dubái, y es un ejemplo de las imágenes de RADAR como mapas de reflectividad, adicionalmente la

variación de contraste, tono y textura demuestra las diversas interacciones con el blanco.

Adicionalmente se distinguen las bandas de adquisición de los sensores, la variedad de longitudes de onda que pueda tener un sensor determina también su interacción con los objetivos, es posible encontrar entonces fenómenos de superficie especular y de backscatter ya sea doble o en volumen (entiéndase backscatter como la reflexión o rebote de la onda), en blancos cuya superficie no permita la penetración de la onda, sin embargo también existen objetivos que serán penetrados, así como algunos de los objetos analizados tendrán poca interacción o una amplia gama de variaciones de backscattering, hay materiales, por ejemplo, los metales, que no producen reflexión difusa, sino que se comportan como espejos produciendo un tipo de dispersión especular. Los reflectores esquinados tienen esa característica y se usan para calibrar imágenes, ya que al colocarse en localidades precisas permiten relacionar su ubicación con la imagen (Fernández Ordoñez & Soria Ruiz, 2015). Las principales bandas encontradas en sensores RADAR son: P, L, S, C, X y K, los radares consideran también la información de retorno polarizada tanto horizontalmente como verticalmente.

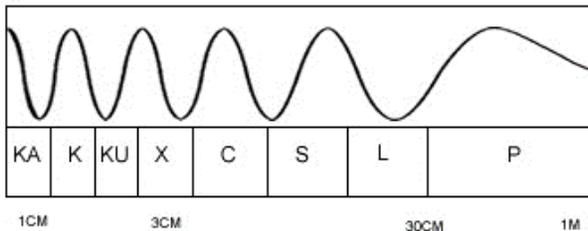


Ilustración 2 Longitud de Onda, región de microondas.
Fuente: Autor

La ilustración 2 muestra la longitud de onda para las bandas que existen dentro del rango manejado por los sensores RADAR.

La resolución de los sistemas radar está dada por el movimiento del sensor y se da en dos direcciones: resolución en rango (perpendicular al movimiento del satélite) y resolución en azimuth (paralelo al movimiento del satélite).

Ecuación 2 Resolución en rango

$$\rho_{RG} = \frac{c}{2B}$$

Ecuación 3 Resolución en azimuth

$$\rho_{AZ} = \frac{L}{2}$$

Las ecuaciones 2 y 3 corresponden a las resoluciones de los sensores RADAR: en rango y en azimuth respectivamente.

Donde c es la constante de la velocidad de la luz, L equivale a la longitud de la antena y B es el ancho de banda.

3. Procesamiento de imágenes SAR

El análisis estadístico de los productos SAR es imperativo para el procesamiento de las imágenes capturadas por los sensores, en la polarimetría SAR, las estadísticas ayudan con la detección y discriminación de firmas de objetivos en un fondo de desorden del terreno. En otra aplicación importante como es la interferometría SAR transversal, el conocimiento exacto de las estadísticas es importante para analizar cuantitativamente la influencia de la correlación en la fase γ , por tanto, medir la precisión de altura alcanzable. (Gierull, 2004), por lo que previo a cualquier procedimiento de filtrado se deben aplicar modelamientos estadísticos de los valores contenidos en cada producto, generalmente muchas de las imágenes de RADAR se encuentran comprimidas horizontal o verticalmente, por lo que ha de realizarse un procedimiento de descompresión en el que se obtienen las bandas correspondientes a las formas de interacción con el blanco y la radiación, cada una de estas corresponde con una imagen polarizada por la dirección en que se emite la energía, esta orientación es inherente al sensor con el que se esté trabajando, generalmente se encuentran las bandas (HH, HV, VH, VV) cada banda cuenta con los valores backscatter. Posterior a la descompresión se ha de realizar una calibración radiométrica de los valores por píxel de las imágenes, ya que los productos SAR de nivel 1 no cuentan con correcciones radiométricas (*Sentinel-1 Radiometric Calibration—ArcMap / Documentation*, n.d.), la calibración permite que se representen los verdaderos valores de backscattering obtenidos por el RADAR.

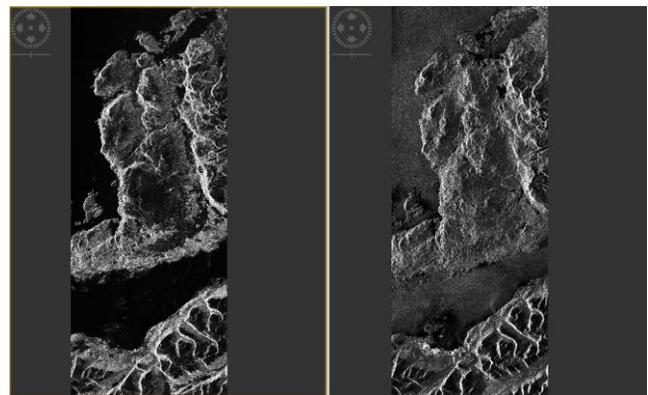


Ilustración 3 Imágenes Polarizadas (interacciones con el blanco). Fuente: Autor.

En la ilustración 3 se puede observar la diferencia que tiene la interacción con el blanco de la misma imagen polarizada de dos formas distintas (VH y VV respectivamente).

La adquisición de información mediante tecnología radar es dependiente de la posición en que esta es direccionada por la plataforma hacia el terreno, de tal forma que la textura que degrada la calidad de la imagen resultante no es ruido, ya que es determinística, es decir que al repetir la captura solo habrán cambios si se modifica la geometría de obtención, este fenómeno conocido como Speckle es el resultado de la suma de las señales individuales capturadas por el sensor que puede resultar en interferencias constructivas o destructivas, por lo que ha de realizarse una corrección estadística, en la que se promedian potencialmente los valores de los píxeles adyacentes, en un procedimiento conocido como Multilooking, por tanto se han de realizar balances estadísticos del Speckle y de los elementos que puedan degradar la calidad de las imágenes para ello, se ha de promediar el moteado tomando varias observaciones de un objetivo en una sola barrida del radar (Greatbatch, 2012). Por lo tanto, ha de conocerse el modelo estadístico al que pertenece la imagen, la clasificación de modelos estadísticos de imágenes SAR puede dividirse en dos categorías modelos paramétricos y no paramétricos. Cuando se trata de un modelo paramétrico al principio se dan varias distribuciones de probabilidad conocidas de las imágenes SAR. Normalmente, los parámetros de estas distribuciones son desconocidos y deben estimarse a partir de los datos reales de la imagen. (Gao, 2010).

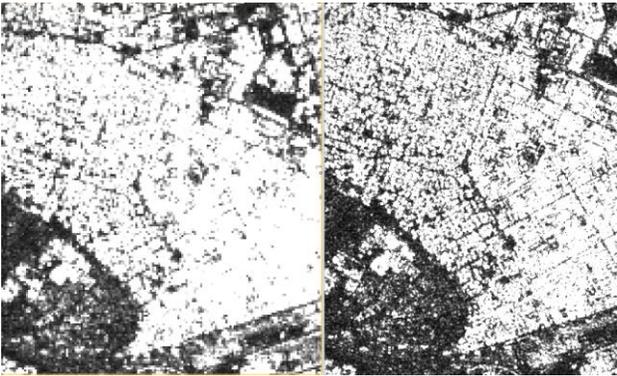


Ilustración 4 Multilooking. Fuente: Autor.

La ilustración 4 muestra la misma imagen antes (izquierda) y después (derecha) del procesamiento Multilooking, se puede apreciar en la imagen de la derecha que el tejido urbano se encuentra mejor definido, existe mayor coherencia en el contraste de cada píxel y se ha eliminado la información que degrada la imagen.

El tratamiento de una imagen radar contiene información de la distancia entre la plataforma y el terreno, esto debido a que el rebote de los ecos se toma en función del tiempo de la onda, por lo que estas imágenes contienen información altimétrica de la zona de análisis, por lo que, se puede realizar un ajuste de las alturas, proyectando la información sobre un datum de referencia, mediante técnicas de remuestreo, tales como correcciones de rango-

Doppler o ajustes por valores de grilla para un geoide de referencia.

Para el procesamiento de imágenes completamente polarimétricas debe realizarse la descomposición de las matrices de covarianza o matrices de coherencia, que son matrices que proporcionan la información de los parámetros de scattering en cada píxel (Parra Garzón et al., 2023), se define también como la matriz del medio material, que en conjunto con la matriz identidad conforman el conjunto completo de magnitudes físicas características (elementos de la matriz de Mueller) (Gil et al., n.d.).

La obtención de la matriz de coherencia permite discriminar la interacción entre el blanco y la polarización, de tal forma que se generan autovalores que permiten realizar modelos estadísticos de comportamiento para el backscattering, como explica (Penta et al., 2014) la matriz de dispersión describe principalmente cómo los blancos radar o los elementos de la superficie del suelo dispersan la energía electromagnética. y, por tanto, permite la descomposición polarimétrica de la imagen, estas descomposiciones se utilizan para generar discriminadores polarimétricos que pueden utilizarse para la interpretación o la clasificación. Los datos SAR totalmente polarimétricos pueden descomponerse para extraer información sobre los procesos de dispersión utilizando diversas técnicas y estos métodos se conocen como "descomposiciones de blancos" (Penta et al., 2014).

Al igual que en el tratamiento convencional de la imagen SAR para elementos que degradan la calidad de la imagen Multilooking, se puede realizar un filtrado del ruido polarimétrico, procedimiento conocido como filtrado polarimétrico Speckle.

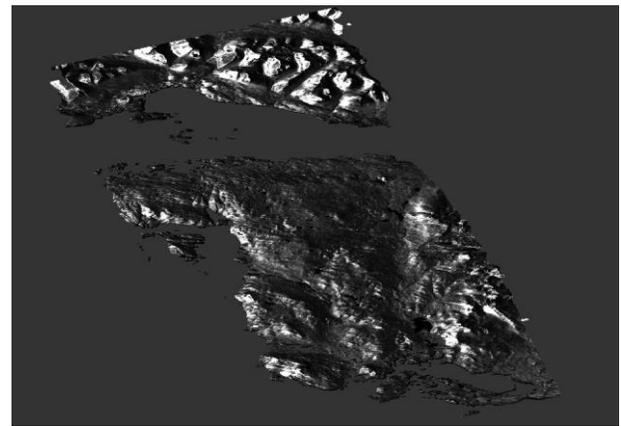


Ilustración 5 Imagen polarimétrica filtrada y proyectada. Fuente: Autor.

La ilustración 5 presenta una imagen full polarizada que fue calibrada, se obtuvo su matriz de coherencia, se filtró,

se ajustó mediante el procedimiento “deskewing”¹ y proyectó al elipsoide WGS 84.

Finalmente se realiza la anteriormente mencionada descomposición polarimétrica, existen varios métodos, tales como la descomposición de Pauli, procedimiento con mayor popularidad y que se caracteriza por clasificar los fenómenos de backscattering en bandas de color (R, G, B) para permitir una visualización de la interacción de cada mecanismo con el blanco, se trata de un método coherente, es decir implica una matriz de correlación y no de dispersión, la asignación en las bandas RGB se realiza mediante las fórmulas:

$$R = \left(\frac{HH - VV}{\sqrt{2}} \right)^2 \quad G = (\sqrt{2}HV)^2 \quad B = \left(\frac{HH + VV}{\sqrt{2}} \right)^2$$

Ecuación 4 Ecuaciones RGB (descomposición de Pauli) para visualización de scattering.

La ecuación 4 demuestra la forma en que se asignan las bandas con diferentes polarizaciones a los canales de luz visible, esto mediante el método de descomposición de Pauli

R,G, B, son las cantidades complejas que representan, respectivamente, el rebote simple, el rebote doble y los componentes de dispersión rotados 45°(Cloude & Pettier, 1996).

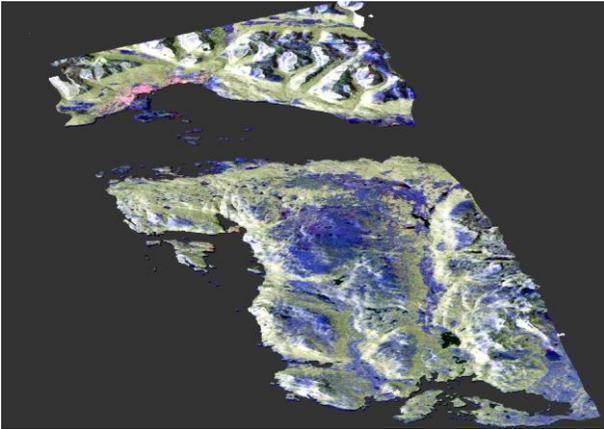


Ilustración 6 Descomposición de Pauli. Fuente: Autor.

La ilustración 6 muestra la descomposición de Pauli de una imagen obtenida por la misión ALOS PALSAR 1. Otro de los modelos más populares es la descomposición de Freeman, modelo que propone tres mecanismos de scattering, en los que se asume que el retorno está orientado aleatoriamente con respecto a la dirección de

observación del radar, con un ángulo ϕ desde la dirección de polarización vertical y cuya matriz se descompone en tres matrices, una para cada mecanismo de rebote (especular, doble y en volumen). (Freeman & Durden, 1998).

Ecuación 5 Componentes descomposición de Freeman.

$$P_s = f_s(1 + |\beta|^2), P_d = f_d(1 + |\alpha|^2), P_v = \frac{8}{3}f_v$$

Estas ecuaciones se aplican a las bandas RGB y representan el scattering simple en la superficie, el rebote doble y el scattering en volumen. Puntualmente f_s , f_d y f_v representan las contribuciones de scattering de los elementos superficie, doble rebote y volumen.

Adicionalmente se puntualiza que estas son el resultado de la descomposición P:

Ecuación 6 Potencia medida, Descomposición de Freeman.

$$P = P_s + P_d + P_v$$

La ecuación 6 representa la ecuación de potencia de la descomposición de Freeman

Donde P es la potencia medida por el sensor.

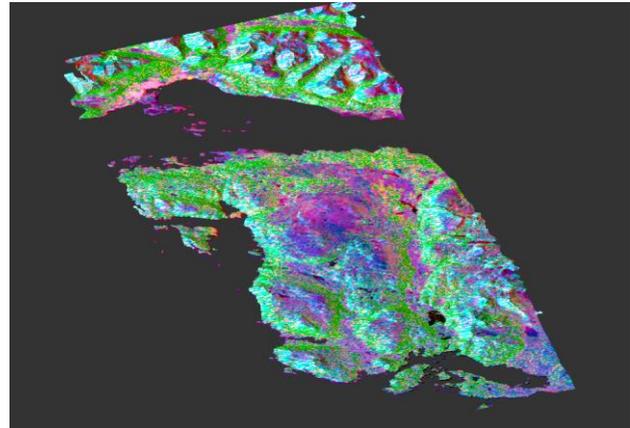


Ilustración 7 Descomposición polarimétrica Freeman. Fuente: Autor.

La ilustración 7 muestra la descomposición polarimétrica por medio del modelo incoherente de Freeman aplicado a una imagen obtenida por medio del servicio ALOS PALSAR 1.

Según la comparativa de múltiples modelos de descomposición realizada por (Zhang et al., 2008) las descomposiciones de Pauli, Freeman y Cameron se ajustaron mejor para la descripción de objetivos naturales, mientras que las descomposiciones SDH, OEC y el modelo de cuatro componentes dieron mejores resultados

¹ La imagen corresponde al satélite ALOS PALSAR 1, cuyas imágenes se encuentran inclinadas respecto al azimut de observación, por lo que deben ser orto corregidas previamente, mediante un procedimiento conocido como deskewing.

para describir objetivos creados por el humano, sin embargo también especifica que esta conclusión se obtuvo realizando tan solo una prueba, por lo que se recomienda realizar una revisión y seguimiento de los resultados en otros análisis.

4. Adquisición de imágenes SAR con drones

La implementación de drones en conjuntos con sensores hiperespectrales es cada vez más común, hecho que también ha involucrado a los sistemas de RADAR, tecnología que a priori, presenta múltiples ventajas con respecto a las técnicas más comunes de teledetección y fotogrametría, tales como las inherentes a la naturaleza de la onda, cuyas características físicas le permiten inhibir los efectos tanto de la atmosfera como de la climatología, por lo que, en conjunto con la posibilidad de realizar análisis de mediana y pequeña escala mediante drones facilita y disminuye los costos de la producción de cartografía y los análisis de coberturas resultantes de la conjunción de estas dos tecnologías.

Se ha demostrado que la implementación de sistemas de radar en drones permite una correcta asimilación de la información capturada por el sensor pues este es dependiente del ancho de banda de transmisión del pulso, por lo que la única modificación de este parámetro hace viable la adecuación de sistemas RADAR en UAV'S en palabras de (Jenssen et al., 2020) el ancho de banda del sistema de radar

es un parámetro fundamental de la resolución de alcance y, teóricamente, el único atributo que puede modificarse para mejorar la resolución de alcance de forma significativa, en la investigación de Jenssen se utilizó un RADAR de banda ultrancha montado en un dron de 8 hélices para realizar un análisis de las propiedades de una cobertura de nieve, para realizar una correcta toma de datos se ajustó el ancho de banda en el rango de 8-18 GHZ con una correlación de 0.92 relativa a la profundidad del sitio, las mediciones fueron correctas y concluye que Las imágenes radar resultantes del vuelo de prueba muestran respuestas similares entre la mediciones realizadas en la nieve con las mediciones en tierra. Por tanto, podemos el UWIBASS² funciona bien cuando se monta en una plataforma aérea.(Jenssen et al., 2020).

Una de las principales adversidades que enfrentan los sistemas de RADAR en una plataforma aérea como el dron son las distorsiones inherentes al movimiento de la aeronave puesto que estas son plataformas mucho menos estables, sin embargo, tal y como demuestran (Bekar et al., 2022) es posible conseguir precisiones de hasta 2cm mediante la utilización algoritmos de autoenfoco y corrección del centroide, en conjunto con tecnología

GPS/INS-based MoCo para ajustar los movimientos de la plataforma y lograron demostrar que la implementación de estas tecnologías en conjunto es funcional en rangos cortos y utilizando anchos de banda amplios.

Un experimento reciente incorporó un sistema de dron con un sensor RADAR, en la investigación de (Svedin et al., 2021) se utilizó un UAV desarrollado por los autores y se realizaron variaciones de las condiciones de adquisición de las imágenes, y se encontró que las que incorporaron la unidad de movimiento inercial (IMU) contienen una notoria mejoría en la calidad del producto, el estándar de evaluación fue la cantidad de pixeles generados en la imagen, se encontró que la mayor desviación en los estándares de calidad surge en los momentos en que hay perturbaciones en el vuelo, tales como la velocidad o las condiciones de viento, problemáticas que se solucionaron con la incorporación de sistemas de ³control de actitud.

Otra tecnología que se adapta al uso de Drones y cuya confluencia con la tecnología SAR produce gran expectativa son los sensores LiDar, los cuales representan la última innovación en el campo de los sensores remotos, esta emerge a mediados de 1990 y provee datos de alta velocidad y precisión (Agrawal & Khairnar, 2019). Se trata de un mecanismo que emplea sensores activos que disparan un láser con características físicas conocidas y que por tanto puede obtener con gran versatilidad datos de altura facilitando el desarrollo de modelos de elevación. La utilización de ambos métodos ha generado una enriquecedora discusión durante los últimos años. (Kahraman & Bacher, 2021) afirman que la confluencia de ambas tecnologías permitiría una lectura mucho más completa, ya que los datos LiDar tiene información tridimensional precisa, y puede clasificar los datos utilizando información de altura, sin embargo, carecen de habilidad para clasificar información espectral, por lo que los autores realizan una revisión completa de la literatura en la que se realizan combinaciones de información mediante diversos métodos, a pesar de que son modelos aun en desarrollo, estos permitirían generar conjuntos de información completos a partir de la confluencia de dos tecnologías en auge y con tendencia a prevalecer en el campo científico.

² UWIBASS: Sonda de nieve, es un sistema de radar desarrollado para realizar análisis de coberturas de nieves y adaptado para operaciones realizadas con dron

³ Attitude Sensors: Sensores de control de actitud, son sensores que permiten el control la orientación durante la navegación

5. Conclusiones

A través de los estudios analizados es posible concluir que existe una amplia línea investigativa que ha desarrollado con éxito modelos de estudio y análisis para imágenes RADAR, permitiendo estudios en grandes áreas y con resultados precisos, con una serie de ventajas sobre las metodologías más comunes, tornando a las imágenes hiperespectrales de sensores RADAR una tecnología imprescindible en el estudio de coberturas, geología e ingeniería, permitiendo adicionalmente comprender el comportamiento de los diversos objetivos ante la incidencia de una serie de campos electromagnéticos cuyo vector puede variar en dirección e intensidad según las características del sensor, incrementando la gama de análisis que se pueden realizar mediante esta tecnología, factor que la hace polivalente en utilización y aplicación. Se llega a la conclusión de que hay una diversidad de enfoques en el tratamiento y procesamiento de los productos de servicios RADAR. Muchos de estos enfoques se centran en el análisis radiométrico, mientras que otros exploran la riqueza del componente polarimétrico de las imágenes. Lo que comparten estos métodos es una sólida influencia matemática y estadística, diferenciando sus metodologías según el propósito particular. Por ejemplo, las descomposiciones polarimétricas destacan como especialmente eficaces en ciertas aplicaciones. Este panorama resalta la importancia de adaptar las técnicas de tratamiento y procesamiento a las necesidades específicas, evidenciando la versatilidad y la complejidad matemática que caracterizan a la manipulación de datos provenientes de servicios RADAR. En última instancia, se constata que la integración de tecnología RADAR abarca diversas categorías, incluyendo la analizada, SAR, y otros tipos de sensores acoplados a drones. No obstante, se identifican limitaciones y ajustes en estos sensores, los cuales solo logran lecturas de calidad en distancias cortas y con aumentos en el ancho de banda. Además, se hace necesario implementar correcciones de movimiento, dado que la tecnología RADAR fue inicialmente concebida para plataformas con una estabilidad superior a la ofrecida por un dron. A pesar de estos desafíos, se han desarrollado estrategias efectivas para mitigar tales errores, resultando en lecturas de alta calidad. Este panorama destaca la adaptabilidad y la capacidad de superar obstáculos inherentes a la integración de tecnología RADAR con drones, evidenciando avances significativos en la optimización de la calidad de los datos obtenidos.

A pesar de que la incorporación de estas tecnologías es algo reciente se han dado casos de adopción satisfactoria, a pesar, de que se observó en todos los casos que han de cumplirse una cierta cantidad de condiciones de vuelo y climáticas que disminuyan las perturbaciones en la operación de vuelo son dos tecnologías con el potencial de

trabajar juntas, ampliando las expectativas de uso para ambos sistemas.

Bibliografía

- Agrawal, S., & Khairnar, G. B. (2019). A comparative assessment of remote sensing imaging techniques: Optical, sar and lidar. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*, 42(5/W3), 1–6. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-5-W3-1-2019>
- Bekar, A., Antoniou, M., & Baker, C. J. (2022). Low-Cost, High-Resolution, Drone-Borne SAR Imaging. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 60. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2021.3085235>
- Cloude, S. R., & Pettier, E. (1996). A review of target decomposition theorems in radar polarimetry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 34(2), 498–518. <https://doi.org/10.1109/36.485127>
- Fernández Ordoñez, Y. M., & Soria Ruiz, J. (2015). Imágenes de radar de apertura sintética y conceptos básicos de polarimetría. *Avances y perspectivas de geomática con aplicaciones ambientales, agrícolas y urbanas*, 37–66.
- Freeman, A., & Durden, S. L. (1998). A three-component scattering model for polarimetric SAR data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 36(3), 963–973. <https://doi.org/10.1109/36.673687>
- Gao, G. (2010). Statistical modeling of SAR images: A survey. In *Sensors* (Vol. 10, Issue 1, pp. 775–795). <https://doi.org/10.3390/s100100775>
- Gierull, C. H. (2004). Statistical analysis of multilook SAR interferograms for CFAR detection of ground moving targets. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 42(4), 691–701. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2003.821886>
- Gil, J. J., Ferreira, C., Correias, J. M., Melero, P. A., San José, I., & Delso, J. (n.d.). matrices de coherencia: un modelo unificado para la representación matemática de fenómenos polarimétricos.
- Greatbatch, I. (2012). *Polarimetric Radar Imaging: from basics to applications*, by Jong-Sen Lee and Eric Pottier. *International Journal of Remote Sensing*, 33(2), 661–662. <https://doi.org/10.1080/01431161.2010.535193>
- Jensen, J. R., & Lulla, K. (2008). *Introductory digital image processing: A remote sensing perspective*. Jensen, J. R., & Lulla, K. (1987). *Introductory Digital Image Processing: A Remote Sensing Perspective*. *Geocarto International*, 2(1), 65–65.

- Doi:10.1080/10106048709354084 , 1–2.
<https://doi.org/10.1080/10106048709354084>
- Jenssen, R. O. R., Eckerstorfer, M., & Jacobsen, S. (2020). Drone-mounted ultrawideband radar for retrieval of snowpack properties. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 69(1), 221–230.
<https://doi.org/10.1109/TIM.2019.2893043>
- Kahraman, S., & Bacher, R. (2021). A comprehensive review of hyperspectral data fusion with lidar and sar data. In *Annual Reviews in Control* (Vol. 51, pp. 236–253). Elsevier Ltd.
<https://doi.org/10.1016/j.arcontrol.2021.03.003>
- Parra Garzón, J. C., Herrera Escorcia, J. L., & Triana Forero, R. (2023). Análisis polarimétrico de uso y cobertura de la tierra utilizando SAR polarimetry target analysis y la metodología Corine Land Cover. *Perspectiva Geográfica*, 28(2), 1–16.
<https://doi.org/10.19053/01233769.14336>
- Penta, B., Rao Kakani, N., & Kumar Joshi, A. (2014). Analysis of Synthetic Aperture Radar polarimetric decomposition methods for land cover interpretation.
<https://doi.org/10.13140/RG.2.1.3646.6723>
- Sentinel-1 Radiometric Calibration—ArcMap | Documentation. (n.d.). Retrieved November 28, 2023, from <https://desktop.arcgis.com/en/arcmap/latest/manag-e-data/raster-and-images/sentinel-1-radiometric-calibration.htm>
- Svedin, J., Bernland, A., Gustafsson, A., Claar, E., & Luong, J. (2021). Small UAV-based SAR system using low-cost radar, position, and attitude sensors with onboard imaging capability. *International Journal of Microwave and Wireless Technologies*, 13(6), 602–613.
<https://doi.org/10.1017/S1759078721000416>
- Zhang, L., Zhang, J., Zou, B., & Zhang, Y. (2008). Comparison of Methods for Target Detection and Applications Using Polarimetric SAR Image. In *PIERS ONLINE* (Vol. 4, Issue 1).
<https://www.researchgate.net/publication/2662698>

Notaciones para el procesamiento de nubes de puntos en modelos digitales Notations for processing point clouds in digital models

Received: 02 02 2024, Accepted: 21 06 2024, Available online: 08 07 2024

Mariana Montes Parra

Ingeniería topográfica; Integrante semillero de investigación TOPOCOORS, Facultad de Medio Ambiente y recursos Naturales. Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Bogotá D.C., Colombia. mmontesp@udistrital.edu.co

Dina Sofia Guadrón Álvarez

PhD (c) Educacion, Msc. comunicación Educativa. Lic. Educación Básica con énfasis en matemáticas
Docente Secretaría de Educación Bogotá. sofias@utp.edu.co
<https://orcid.org/0000-0003-3956-7154>

Diana Del Pilar Ruiz Pino

PhD Educacion, Msc. Docencia Universitaria. Lic. Química
Docente Secretaría de Educación Bogotá. dianaruiz1927@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0002-3469-6267>

Resumen

La mejora de algoritmos de procesamiento de nubes de puntos LiDAR para la obtención de modelos digitales del terreno (MDT) de alta precisión es de gran importancia para las aplicaciones cartográficas y geoespaciales en la actualidad. En este tipo de procesos principalmente se aborda el filtrado de ruido y la eliminación de outliers o de información innecesaria en la nube, trabajando con filtros estadísticos y morfológicos para mejorar la calidad de la nube de puntos.

En la fase inicial, los algoritmos de filtrado y eliminación de ruido desempeñan un papel esencial, se utilizan técnicas como filtros de densidad y eliminación de outliers para limpiar la nube de puntos y mejorar la calidad de los datos, la división y clasificación son llevadas a cabo por algoritmos que fragmentan la nube en segmentos y asignan una categoría a los puntos, facilitando la identificación de objetos presentes en la nube, como el suelo, la vegetación y los edificios.

La generación de modelos se realiza mediante algoritmos que emplean métodos como la triangulación de Delaunay e interpolación espacial para crear mallas tridimensionales y estimar elevaciones en ubicaciones sin datos, esto ayuda a entender de una mejor manera el entorno. La extracción de características específicas, como bordes, edificios y vegetación, se realiza mediante algoritmos especializados que identifican patrones y características distintivas en la nube de puntos, para el ajuste de superficies y modelos implica algoritmos que utilizan técnicas polinómicas y específicas para modelar la topografía del terreno. El registro y la corrección geométrica son llevados a cabo por algoritmos que alinean múltiples conjuntos de datos y corrigen errores del sistema y desviaciones. La visualización y representación se mejoran mediante algoritmos que facilitan la visualización en entornos 3D y asignan colores a los puntos LiDAR según la configuración RGB para crear representaciones visuales más realistas.

Para sintetizar la información se dice que los algoritmos para el procesamiento de nubes de puntos LiDAR son herramientas importantes que permiten la transformación de datos crudos en información útil y detallada, su continua mejora impulsa la precisión y eficacia de la generación de MDT, impactando positivamente en una variedad de disciplinas, desde la ingeniería hasta la gestión del medio ambiente.

Palabras clave: Lidar, Nubes de puntos, algoritmos. Modelos digitales

Abstract

The improvement of LiDAR point cloud processing algorithms to obtain high-precision digital terrain models (DTM) is of great importance for cartographic and geospatial applications today. This type of process mainly addresses noise filtering and the elimination of outliers or unnecessary information in the cloud, working with statistical and morphological filters to improve the quality of the point cloud.

In the initial phase, filtering and denoising algorithms play an essential role, techniques such as density filters and outlier removal are used to clean the point cloud and improve data quality, division and classification are carried out.

by algorithms that fragment the cloud into segments and assign a category to the points, facilitating the identification of objects present in the cloud, such as soil, vegetation and buildings.

Model generation is carried out through algorithms that use methods such as Delaunay triangulation and spatial interpolation to create three-dimensional meshes and estimate elevations in locations without data, this helps to better understand the environment. The extraction of specific features, such as edges, buildings and vegetation, is carried out using specialized algorithms that identify distinctive patterns and features in the point cloud, for the adjustment of surfaces and models involves algorithms that use polynomial and specific techniques to model the topography of the land. Registration and geometric correction are carried out by algorithms that align multiple data sets and correct system errors and deviations. Visualization and rendering are enhanced by algorithms that facilitate visualization in 3D environments and assign colors to LiDAR points based on RGB settings to create more realistic visual representations.

To synthesize the information, it is said that the algorithms for the processing of LiDAR point clouds are important tools that allow the transformation of raw data into useful and detailed information, their continuous improvement boosts the precision and effectiveness of the generation of MDT, positively impacting on a variety of disciplines, from engineering to environmental management.

Key Words: *Lidar, Point clouds, algorithms. Digital models*

1. Introducción

El procesamiento de nubes de puntos LiDAR ha cambiado la forma en que se comprende y modela el entorno tridimensional, el proceso de manipulación y análisis de estas nubes de puntos LiDAR, conocido como procesamiento LiDAR, implica una serie de técnicas avanzadas, desde la eliminación de ruido y la división del terreno hasta la interpolación espacial y la clasificación de objetos, el procesamiento de nubes de puntos LiDAR desempeña un papel crucial en la generación de modelos digitales del terreno, la identificación de características y la toma de decisiones basada en datos precisos y detallados.

La tecnología LiDAR (Light Detection and Ranging) trabaja con pulsos láser para medir distancias y registrar las reflexiones de la luz desde la superficie terrestre. A partir de los datos, se generan nubes de puntos densas tridimensionales, las cuales, mediante algoritmos avanzados, permiten la creación de modelos digitales de terreno de alta precisión. Estos modelos no solo revelan la topografía del terreno, sino que también proporcionan información detallada sobre la estructura y la vegetación. Los modelos digitales de terreno (MDT) simbolizan una representación matemática tridimensional de la topografía de la superficie terrestre, capturando las elevaciones de manera precisa y detallada. Este tipo de modelos son esenciales en áreas de estudio como la cartografía, la planificación urbana, la gestión ambiental y diversas aplicaciones geoespaciales. La información contenida en un MDT se obtiene a través de diversas fuentes, siendo una de las tecnologías destacadas la teledetección LiDAR.

2. Modelos digitales de terreno de alta precisión

La definición de modelo en el área de geográfica se define como una representación de la realidad con algunas de sus propiedades (Joly, 1988), esto quiere decir que la representación de la realidad que se presenta a partir de un modelo solo muestra algunas de las propiedades.

Los modelos digitales de terreno están categorizados como tipo simbólicos, ya que estos se representan de manera matemática, lo que quiere decir que las relaciones que se establecen con el objeto tienen forma de algoritmos matemáticos (Doyle, 1978), aunque para muchos autores estas definiciones son ambiguas y no abarcan lo principal de los modelos digitales de terreno, por lo cual una de las definiciones más acertadas concisas y completas es un MDT es una estructura numérica de datos que representa la distribución espacial de una variable cuantitativa y continua (Felicísimo Pérez, 1994). Los MDT son utilizados para simulaciones dinámicas sus principales características se describen de una manera más clara a continuación.

La resolución espacial se refiere al tamaño de los píxeles o puntos en el modelo. Un MDT de alta resolución capturan detalles mínimos del terreno, mientras que los modelos de baja resolución brindan una visión más general.

La exactitud se relaciona con la veracidad de las elevaciones representadas en el modelo con respecto a las elevaciones de la realidad. Factores como la precisión de los datos y la calidad del procesamiento afectan la exactitud.

Las fuentes de datos para la creación de un MDT incluyen teledetección LiDAR, imágenes satelitales, fotografías aéreas, mediciones topográficas y datos GNSS.

Los MDT tienen registros desde los años 50, cuando en el laboratorio de fotogrametría del Instituto de Tecnología de Massachussets se realizan los estudios por parte de Miller y Laflamme (1958) para determinar los principios de uso de estos modelos, con el fin de tratar problemas tecnológicos científicos y militares.

El objeto de su trabajo fue acelerar el diseño de las carreteras mediante el procesamiento digital de datos del terreno conseguidos por fotogrametría, planteándose una sucesión de algoritmos para la obtención de pendientes, áreas, etc. El problema del número de datos se planteó de forma crítica, dada la escasa capacidad de almacenamiento de los ordenadores en aquella época, y se propuso el uso de ecuaciones polinómicas para almacenar segmentos de los perfiles topográficos.

A lo largo del tiempo la evolución de los MDT ha sido evidente, debido a los avances en la tecnología de teledetección, procesamiento de datos y análisis espacial, estos progresos se han dado gracias a la necesidad de los usuarios de comprender mejor el entorno tridimensional que los rodea. En las primeras etapas de la creación de modelos topográficos se utilizaban técnicas de fotogrametría (fotografías aéreas), estos métodos eran complicados y dependían de la interpretación visual del operario encargado para derivar elevaciones.

La introducción de la teledetección LiDAR (Light Detection and Ranging) fue un suceso significativo para el trabajo de obtención de información cartográfica, los sensores LiDAR aéreos comenzaron a capturar datos tridimensionales del terreno mediante la emisión de pulsos láser y la medición de su tiempo de retorno, gracias a esta tecnología la recolección de datos se comenzó a realizar de una manera más eficiente y detallada. El avance en la resolución de sensores remotos, tanto ópticos como LiDAR, permitió la captura de datos más detallados, mejorando la calidad y la precisión de los MDT.

Además la integración de datos multiespectrales, como imágenes de satélites con diferentes bandas espectrales, influyo a mejorar la interpretación del terreno y la clasificación de características, con el aumento en la cantidad de datos LiDAR y satelitales, la computación en la nube y las tecnologías de big data se han vuelto esenciales para el procesamiento eficiente y rápido de grandes conjuntos de datos.

Para la mejora de estas nuevas herramientas se han desarrollado algoritmos más avanzados para el procesamiento de nubes de puntos LiDAR, la interpolación espacial y la clasificación automática de características, mejorando la calidad y la precisión de los MDT.

En la actualidad la adopción de LiDAR terrestre y móvil, utilizando vehículos equipados con sensores, permite la captura de datos en áreas de difícil acceso y mejora la resolución espacial en entornos urbanos. La integración de MDT con tecnologías emergentes, como inteligencia artificial (IA) y aprendizaje automático (ML), mejora la capacidad de clasificación automática de características y la interpretación de datos.

La evolución hacia MDT dinámicos y en tiempo real permite la monitorización continua de cambios en el terreno, brindando información actualizada y relevante. Los MDT se ha centrado cada vez más en la sostenibilidad y la adaptación al cambio climático, contribuyendo a la gestión de recursos naturales y la planificación resiliente. Los programas espaciales y satélites de observación de la Tierra, como los de la NASA y la ESA, han proporcionado conjuntos de datos globales, permitiendo la generación de MDT a nivel mundial.

3. Mejora de algoritmos de procesamiento de nubes de puntos LiDAR

La elaboración de los modelos procedentes de los procesos de simulación dinámica es posible gracias al diseño de algoritmos numéricos, es decir, secuencias claras de operaciones matemáticas que llevan a la solución de problemas determinados. El correcto funcionamiento de los algoritmos es susceptible a la revisión mediante el contraste o verificación del modelo derivado de un objeto real. Este contraste se ejecuta mediante métodos de análisis de error el cual habitualmente se basa en la comparación de una muestra extraída del modelo con medidas realizadas sobre el terreno, los resultados del análisis del error permiten efectuar ajustes en el algoritmo, aumentando su fiabilidad de los datos y, por tanto, su capacidad predicción.

Finalmente se concluye que un algoritmo sólidamente construido, aplicado sobre un MDT verídico, permite apreciar propiedades que pueden ser aplicadas al objeto real con márgenes de error mínimos, aportando información difícil de obtener por otros medios. (Felicísimo Pérez, 1994).

Para una mayor claridad sobre los procesos implicados en la creación manejo y explotación de los MDT se muestra la figura 1 la cual muestra un diagrama de como mediante una consecución de procesos y algoritmos se logra obtener una simulación de la realidad.



Figura 1 Modelo de procesos para un MDT

Fuente: Modelos Digitales de Terreno (Libro) Angel M. Felicimo

El procesamiento de nubes de puntos LiDAR requiere varias etapas, desde la limpieza y filtrado de los datos crudos hasta la generación de modelos y la extracción de información específica, algunos de los algoritmos más comunes utilizados en el procesamiento de nubes de puntos LiDAR se mencionan a continuación.

Filtrado y Eliminación de Ruido:

La filtración de información elimina puntos repetitivos o de baja densidad para mejorar la eficiencia y precisión, por otro lado, el filtrado de Outliers cumple la función de identificar y eliminar los puntos que se desvían de la nube general, lo que podría deberse a errores sistemáticos o interferencias presentes durante la recolección de datos.

Segmentación y Clasificación:

La segmentación lo que realiza es una división de la nube de puntos en secciones basados en diferencias de altura, lo que representa objetos distintos en el terreno además se tiene la herramienta de clasificación supervisada la cual se trabaja para clasificar los puntos de la nube en categorías específicas, como suelo, vegetación, edificios, etc. Conjuntamente esta la herramienta que clasifica puntos según las características de los puntos vecinos más cercanos, lo que ayuda en la segmentación y clasificación más acorde a la realidad.

Generación de Modelos Superficiales:

La Triangulación de Delaunay es una de las técnicas de generación de modelos más útiles ya que crea mallas tridimensionales conectando los puntos más cercanos, generando modelos superficiales, la Figura 2 representa como se ejecuta este proceso.

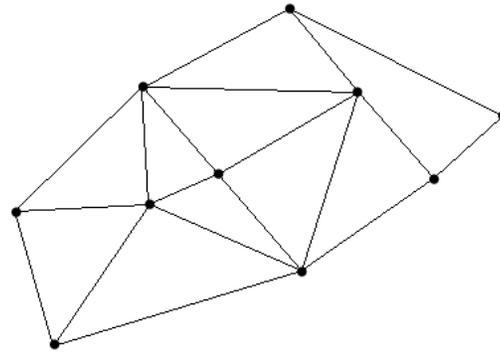


Figura 2 Delaunay

Fuente: Propia (basada en el modelo de Delauna)

Otra de las técnicas es la interpolación de Superficies donde se utilizan métodos que generen una interpolación, como splines o kriging, para estimar elevaciones en ubicaciones donde no hay datos LiDAR.

4. Extracción de Características

Este proceso se lleva a cabo mediante varias herramientas, una de ellas es la detección de bordes la cual, identifica discontinuidades en la nube de puntos para así divisar los bordes y características distintivas de la zona en estudio. Por otro lado, se tiene la extracción de edificios la cual trabaja con algoritmos específicos para identificar y modelar la forma tridimensional de edificios en la nube de puntos, como ultima herramienta para la extracción de información se tiene la identificación de vegetación para hacer efectiva la clasificación de este tipo se utilizan características como la densidad y la altura, para identificar y clasificar áreas cubiertas por vegetación.

Ajuste de Superficies y Modelos:

El ajustar polinomios en pequeñas áreas de la nube de puntos permite modelar superficies de una manera más eficaz. El modelado del terreno tiene que utilizar este tipo de algoritmos y otros más específicos para modelar la topografía del terreno lo más acorde a la realidad a partir de la nube de puntos.

Registro y Corrección Geométrica:

Registro Iterativo más Cercano (ICP) es una de las técnicas de recolección de datos ya que alinea varias nubes de puntos para corregir errores geométricos y registrar datos de diferentes ubicaciones. Conjuntamente se trabaja la corrección atmosférica la cual aplica correcciones

teniendo en cuenta efectos atmosféricos que pueden afectar las mediciones LiDAR.

Visualización y Representación:

La visualización en 3D trabaja con herramientas y algoritmos que permiten la visualización de la nube de puntos en un modo tridimensional que permite al usuario evaluar la realidad apartir del modelo, para ello se deben generar imágenes RGB cuyo trabajo es signar colores a los puntos LiDAR según cofiguracion RGB dispuesta para la creación de representaciones visuales más realistas y detalladas.

Algoritmos de Machine Learning:

Los algoritmos Machine Learning se identifican en dos tipos los primeros son la clasificación automática la cual clasifica ciertos elementos de la nube en una cantidad de grupos ya determinados por los algoritmos fijados. El siguiente es la segmentación semántica la cual asigna etiquetas semánticas a regiones en la nube de puntos, como carreteras, edificios, etc.

Estos algoritmos son solo algunos de los más utilizados ya que la elección específica depende de los objetivos del proyecto y la calidad de los datos LiDAR, la combinación de múltiples técnicas o de algoritmos se utiliza para obtener resultados más precisos y detallados.

Los métodos de sustitución usan algoritmos de interpolación que obtienen un valor congruente derivado del contexto del punto problema. El objetivo es conseguir que las pruebas de detección de errores, en una posterior ejecución, den de paso el nuevo valor y no lo consideren conflictivo. (Felicísimo Pérez, 1994)

Los algoritmos para ordenación son muy eficaces, aun que en algunos casos la operación puede ser prácticamente imposible como es el caso de modelos de grandes dimensiones. En estos casos es conveniente realizar una agrupación de los datos, a partir de la cual el cálculo de la mediana es mucho más sencillo. (Felicísimo Pérez, 1994)

Los algoritmos cúbicos suelen aplicarse en dos fases en secuencia para estimar la altitud de un punto (x,y). En la primera se realizan estimaciones independientes para las cuatro filas más próximas al punto, en la segunda fase se toman los cuatro valores de z obtenidos en la fase anterior y se realiza la estimación final para la ordenada. (Felicísimo Pérez, 1994).

El uso de estos tipos de correcciones puede ser útil en operaciones de clasificación de las imágenes ya que reducen la varianza (ecuación 1) dentro de las clases, reflejando un mejor funcionamiento de los algoritmos de asignación. En efecto, ha sido comprobado que la corrección del efecto topográfico reduce la distancia espectral entre clases del mismo tipo de vegetación sometidas a diferentes condiciones de iluminación (Marquinez, 1994).

$$\sigma^2 = \frac{\sum_1^N (X_i - \bar{X})^2}{N}$$

Ecuación 1 Varianza

X: Variable

X_i= Observación numero i de la variable X

N: Número de observaciones

\bar{X} : Medida de la variable X

Los algoritmos de interpolación usados en los procesos de transformación vector-raster también pueden producir ciertos tipos de formas, especialmente cuando la distancia entre filas y columnas del modelo matricial es pequeña en comparación con la resolución del modelo vectorial. (Felicísimo Pérez, 1994)

El procesamiento de nubes de puntos LiDAR ha experimentado avances significativos, pero aun así es necesario mejorar continuamente, ya que las necesidades del usuario van cambiando conjuntamente avanza la tecnología lo cual impone que estos procesos siempre se estén actualizando para cumplir con las expectativas y necesidades.

La eficiencia computacional ha llevado al desarrollo de algoritmos más eficientes en cuestiones de tiempo, ejecución y consumo de recursos computacionales, lo que ha facilitado el procesamiento rápido de grandes conjuntos de datos LiDAR, de igual manera a medida que las necesidades incrementan la eficiencia debe ir incrementando para así dar solución oportuna. De igual modo la filtración de ruido debe mejorar, programando algoritmos de eliminación más efectivos para que la limpieza de puntos de ruido y artefactos se vuelva mucho más automática sin tener la interacción de operario, especialmente en entornos complejos o con datos de baja calidad.

La adaptabilidad a diferentes entornos es primordial para no generalizar la información a un solo tipo, la creación de algoritmos que sean altamente adaptables a una variedad de entornos, incluidos entornos urbanos, bosques densos, áreas montañosas y terrenos complejos. La necesidad de mejora de los algoritmos de registro y fusión de datos para manejar eficientemente conjuntos de datos LiDAR de diferentes momentos temporales o adquiridos desde múltiples plataformas es una de las metas para los involucrados con el manejo de esta información.

Por consiguiente, la implementación de algoritmos para la automática calibración permitiría corregir automáticamente posibles desviaciones y errores sistemáticos en las mediciones LiDAR, además de algoritmos capaces de integrar y aprovechar datos de múltiples sensores, como cámaras RGB, para mejorar la calidad y la información derivada de la nube de puntos.

El mejoramiento en la interpolación espacial con algoritmos especiales para un correcto desempeño de esta función que implique una mayor precisión, especialmente en áreas con datos faltantes o con irregularidades topográficas, además ejecutar una interfaz de usuario y de herramientas de visualización para facilitar la interpretación y análisis de resultados por parte de usuarios no expertos.

Estas mejoras contribuyen a la eficacia, precisión y la aplicación de los algoritmos utilizados en el procesamiento de nubes de puntos LiDAR, haciendo que esta tecnología sea aún más importante en todas las aplicaciones en la que es necesaria.

Desafíos y Tecnologías Emergentes:

Big Data y Procesamiento Paralelo: El aumento en la cantidad de datos LiDAR y satelitales ha llevado al desarrollo de métodos de procesamiento más eficientes y a la aplicación de tecnologías de big data.

Integración con Tecnologías Emergentes: La integración de MDT con tecnologías como la inteligencia artificial y el aprendizaje automático mejora la clasificación de terrenos y la interpretación de características.

Dinámica del Cambio: La capacidad de capturar cambios en el tiempo, especialmente en entornos dinámicos como zonas urbanas, es un área de investigación activa.

5. Conclusiones

Los avances en algoritmos han llevado a una mejora significativa en la precisión y resolución de los MDT generados a partir de datos LiDAR, esto es fundamental para aplicaciones que requieren información detallada del terreno. La optimización y desarrollo de algoritmos más eficientes han permitido un procesamiento más rápido de conjuntos de datos LiDAR de gran magnitud, esto quiere decir que son útiles para proyectos de grandes extensiones de terreno o que requieren resultados en tiempo real.

Los algoritmos mejorados son más robustos o pesados debido a su funcionalidad ellos son capaces de manejar condiciones variables, como la variabilidad en la densidad de la vegetación, la presencia de edificaciones y otros desafíos topográficos. Se ha evolucionado en la capacidad para integrar datos LiDAR con otras fuentes de información, como imágenes ópticas y datos de sensores, esta integración mejora la calidad y la información derivada de los modelos digitales del terreno.

Los avances en algoritmos han contribuido a la automatización de tareas, desde la eliminación de ruido hasta la clasificación de objetos, ya que estas funciones las hace de manera automática la mayoría de software, lo que indica que está ya no es una labor para hacer de manera manual o que tenga que depender del usuario para definir la clasificación. La aplicación de técnicas de aprendizaje automático para la clasificación y segmentación

automática de la nube de puntos LiDAR ha mejorado la capacidad de estos algoritmos para adaptarse a diferentes contextos y tipos de terreno.

6. Bibliografía

Albert Van Dijk, C. J. (2012). *LiDAR: A Remote Sensing Technology*.

Albert Van Dijk, C. J. (2012). *LiDAR: A Remote Sensing Technology*.

Bolstad, P. (2019). *GIS Fundamentals: A First Text on Geographic Information Systems*.

Díaz, M. (1992). *Caracterización de un sistema gráfico orientado a la ingeniería del terreno*.

Doyle, F. (1978). *Digital terrain models: an overview*.

Dubois, L. H. (2018). *Lidar: Technologies, Applications, and Emerging Markets*.

Fabio Remondino, J. L. (2017). *Laser Scanning: Update 1: First Official Publication of the International Society of Laser Scanning: INSOLAS*.

Felicísimo Pérez, A. M. (1994). *Modelos digitales de terreno*. Pentalfa Ediciones.

Florinsky, I. (2016). *Digital Terrain Analysis in Soil Science and Geology*.

Hannah, M. (1981). *Error detection and correction in Digital Terrain Models*.

Hobson, R. (1972). *Surface roughness in topography: quantitative approach*.

Huang, W. (2014). *LiDAR Remote Sensing and Applications*.

ie Shan, C. K. (2009). *Topographic Laser Ranging and Scanning: Principles and Processing*.

John P. Wilson, J. C. (2000). *Terrain Analysis: Principles and Applications*.

Joly, F. (1988). *La cartografía*. Barcelona: Oikos-Tau.

Mark, D. M. (1975). *Geomorphometric parameters: a review and evaluation*.

Marquinez. (1994).

Michael Bishop, P. P. (2009). *Digital Terrain Modeling: Principles and Methodology*.

Paul A. Longley, M. F. (2015). *Geographic Information Science and Systems*.

Paul A. Rosen, S. H. (2018). *Introduction to LiDAR*.

Thomas Lillesand, R. W. (2014). *Remote Sensing and Image Interpretation*.

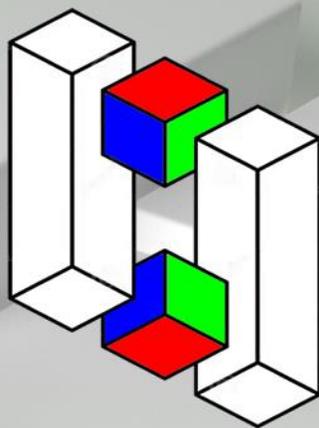
Werner, C. (2005). *Lidar: Range-Resolved Optical Remote Sensing of the Atmosphere*.

Wood, J. ((1996)). *The Geomorphological Characterisation of Digital Elevation Models*.

Yang, Y. (2017). *Lidar Remote Sensing for Industry and Environment Monitoring*.

Zhang, Z. (2019). *Lidar Remote Sensing and Applications*.

Science Advanced



Descubre la ciencia sin límites
ISSN 3028-5216 - On Line