

Determinación de las diferencias en el dimensionamiento de los proyectos viales producto de la utilización del único origen nacional de coordenadas en Colombia: estudio de caso

Determination of the differences in the dimensioning of road projects resulting from the use of the single national origin of coordinates in Colombia: a case study

Yulian Leonardo González Larrarte¹, Saieth Baudilio Chaves Pabón²

¹ Ingeniero Civil, Programa de Ingeniería Civil, Facultad de Estudios a Distancia, Universidad Militar Nueva Granada, Cajicá, Colombia.

² Doctor en Ingeniería, Docente del Programa de Ingeniería Civil, Facultad de Estudios a Distancia, Universidad Militar Nueva Granada, Cajicá, Colombia.

E-mail: saieth.chaves@unimilitar.edu.co

Cite this article as: Y. González Larrarte, S. Baudilio
“Determinación de las diferencias en el dimensionamiento de los proyectos viales producto de la utilización del único origen nacional de coordenadas en Colombia: estudio de caso”,
Prospectiva, Vol. 23 N° 1 2025.

Recibido: 14/06/2022 / Aceptado: 02/11/2024

<http://doi.org/10.15665/rp.v23i1.2993>

RESUMEN

El presente artículo es el resultado de la investigación “Determinación de las diferencias en el dimensionamiento de los proyectos viales producto de la correcta utilización del único origen de coordenadas”, en la cual, se realizó una comparación técnica de la utilización de los habituales seis orígenes de coordenadas con el único origen propuesto mediante la resolución 471 de 2020, en un proyecto vial entre los municipios de Planadas Tolima y Palermo Huila. Inicialmente se recopilaban datos en campo por medio de sesiones de GPS de mojones previamente fundidos a lo largo de la vía, para los que se efectuó el procesamiento en los dos orígenes antes mencionados, con el fin de analizar los resultados de las diferencias en las distancias dadas por la deformación entre cada vector y sus puntos base. En distancias promedio de 10 kilómetros, se observó una variación de entre 1 a 2 metros, y una diferencia de 3.347 metros al trasladar coordenadas geográficas a cartográficas. Esto implica una variación promedio de 0.12 metros por kilómetro recorrido. Aunque esta diferencia puede parecer redundante en distancias largas, no se considera una discrepancia significativa, dado que cualquier abstracción de la realidad puede generar distorsiones. Este hallazgo resaltó la importancia de tener en cuenta las distorsiones inherentes al proceso de modelado y la conversión de coordenadas en proyectos de gran escala. A pesar de

estas pequeñas variaciones, se concluyó que este método proporciona una alternativa válida para la gestión de coordenadas en contextos donde la transición entre diferentes orígenes suele generar inconvenientes.

Palabras clave: estudio comparativo; georreferenciación; origen cartográfico; deformaciones; geodesia.

ABSTRACT

This paper is the result of the research 'Determination of the differences in the dimensioning of road projects resulting from the correct use of the single origin of coordinates', in which a technical comparison of the use of the usual six origins of coordinates with the single origin proposed by resolution 471 of 2020, in a road project between the municipalities of Planadas Tolima and Palermo Huila was carried out. Initially, data was collected in the field by means of GPS sessions of previously cast ca irms along the road, for which processing was carried out in the two aforementioned origins, in order to analyse the results of the differences in the distances given by the deformation between each vector and its base points. In average distances of 10 kilometres, a variation of between 1 and 2 metres was observed, and a difference of 3.347 metres when transferring geographic coordinates to cartographic coordinates. This implies an average variation of 0.12 metres per kilometre travelled. Although this difference may seem redundant over long distances, it is not considered a significant discrepancy, as any abstraction from reality can lead to distortions. This finding highlighted the importance of taking into account the distortions inherent in the modelling process and coordinate conversion in large-scale projects. Despite these minor variations, it was concluded that this method provides a valid alternative for coordinate management in contexts where the transition between different origins is often problematic.

Keywords: comparative study; georeferencing; cartographic origin; deformations; geodesy.

1. INTRODUCCIÓN

En todos los proyectos de ingeniería civil se tienen etapas fundamentales que hacen parte del desarrollo de la obra las cuales se pueden dividir en diseño, licitación y ejecución, como primera etapa, el diseño es la más importante de las tres conociendo que de esta se derivan las otras dos, y enmarcando que el futuro de la obra está dado por la veracidad de sus estudios. *Se refiere a todo lo relacionado con la planificación, investigación, estudio e información adicional. Es la etapa en la que el proyecto se justifica y se sustenta en términos de viabilidad financiera, técnica y sostenibilidad. O, dicho de otra forma, se sientan las bases del mismo.* [1]

Dentro del diseño como primera actividad se encuentra la identificación de la necesidad, estableciendo los motivos por los cuales se necesita dicha obra, en segunda instancia se encuentra la topografía del terreno o del área a intervenir, en la cual se determina la ubicación exacta y sus factores como las distancias y áreas. ¿Pero qué pasaría si las mediciones que se tienen en plano no coinciden en el terreno?

Mirando la tierra desde el punto de vista de la geodesia “*ciencia que estudia la forma y dimensiones de la Tierra. Esto incluye la determinación del campo gravitatorio externo de la tierra y la superficie del fondo oceánico. Dentro de esta definición, se incluye también la orientación y posición de la tierra en el espacio*” [2]. El hombre desde tiempos antiguos ha sentido la necesidad de conocer los elementos que lo rodean y su ubicación, el hombre pretérito fue el primero que inicio con croquis dibujados en tela o gravados en piedra,

600 años a.C. el filósofo griego Pitágoras afirmaba que la tierra no era plana sino redonda, 300 años más tarde el filósofo Aristóteles también considero esta misma teoría. En el entorno moderno se cuenta con representaciones graficas avanzadas y de alta precisión.

El GPS (Sistema de Posicionamiento Global) se define como un sistema global de navegación por satélites (GNSS) que permite fijar a escala mundial la posición de cualquier objeto sobre la superficie terrestre [3]. Este sistema ha sido creado en el año 1973, con fines militares, ha tenido avances dentro de los usuarios civiles, por ende, se han creado las nuevas técnicas diferenciales, mejorando su precisión al proporcionar datos corregidos por los satélites a los receptores, con el fin de alcanzar una mayor precisión en su post-proceso. El método estático realiza mediciones de diferencias de fase de dos o más receptores que simultáneamente rastrean varios satélites comunes, uno de los cuales reciben datos desde una posición conocida y los otros se sitúan en los puntos cuyas coordenadas se necesitan conocer [4]. Las sesiones de GPS son una técnica topográfica, en la que se involucran un grupo de datos almacenados simultáneamente durante un tiempo suficiente en común, el cual nos brinda la posibilidad de calcular vectores entre todos los puntos y obtener información con precisiones milimétricas.

A partir de los sistemas de referencia, que por medio de puntos de control y un marco de referencia global, se forma una plataforma de georreferenciación que genera coordenadas curvilíneas (latitud y longitud), estos también llamados Sistemas Globales de Referencia, creados por el departamento de defensa de los Estados Unidos y muy conocido en todo el mundo como WGS (World Geodetic System) que en su desarrollo ha ido evolucionando desde WGS60, WGS66, WGS72, hasta el último y que se utiliza en la actualidad WGS84, estos Datum se caracterizan por que su origen de coordenadas cartesianas es geocéntrico, y su uso es netamente militar. Debido a esto la IAG (International Association of Geodesy) promovió una versión civil que llamo GRS (Geodetic Reference System), la cual inicio con el GRS67 y termino en el GRS80, que coincide con el WGS84, por esta razón es que en la actualidad mucha gente habla que el elipsoide de referencia es el WGS84, pero en el uso cotidiano y civil es comúnmente conocido como GRS80.

El sistema geocéntrico de referencia utilizado en la geodesia es el Sistema Convencional de Referencia, cuyo eje X, Y coincide con el plano ecuatorial terrestre y el Z coincide con el eje de rotación terrestre.

El IERS (International Earth Rotation and Reference Systems Service), “*El IERS fue establecido en 1987 por la Unión Astronómica Internacional y la Unión Internacional de Geodesia y Geofísica. De acuerdo con los Términos de Referencia, el IERS cumple su misión a través de los siguientes componentes: Centros Técnicos, Centros de Producto, Centros Combinados, Coordinador de Análisis, Buró Central, Mesa Directiva.*” [5], es el encargado de mantener y proporcionar los Sistemas Convencionales de Referencia a través de cooperación internacional, desde donde se genera información precisa y periódica sobre la orientación terrestre, técnicas de alta confiabilidad y además sirve como conexión entre el ICRF (International Celestial Reference Frame) y el ITRF (International Terrestrial Reference Frame).

Los sistemas convencionales de referencia incluyen el ICRF y el ITRF, por eso el sistema terrestre hace referencia a un sistema celeste. Los sistemas oficiales son el ICRS (International Celestial Reference System) y el ICRF (International Celestial Reference Frame) a partir de estos sistemas se crea el ITRS (International Terrestrial Reference System), por el cual es posible determinar la orientación del eje de rotación terrestre en el espacio.

El ITRS se define con origen en el centro de la masa terrestre, que incluye océanos y la atmosfera, *El ITRS se realiza mediante estimaciones de las coordenadas y velocidades de un conjunto de estaciones observadas por VLBI, LLR, GPS, SLR y DORIS. Su nombre es Marco de referencia terrestre internacional.* [6].

El ITRF está conformado por coordenadas geocéntricas (X, Y, Z) y las velocidades (VX, VY, VZ) de un conjunto de estaciones observadas, cuyas unidades se basan en el sistema internacional. Al hablar de velocidades, se hace referencia a que en la tierra existen placas tectónicas las cuales tienen movimientos y deformaciones que alteran sus coordenadas, pero no afecta la órbita del satélite, por lo que se obliga a realizar un traslado con el tiempo de acuerdo con su variación.

SIRGAS (Sistema de Referencia Geocéntrico para las Américas), surge dado a que el ITRF tiene un cubrimiento mundial, resulta insuficiente por las grandes distancias, por esta razón se establecen desinfecciones continentales, nacionales y regionales. De acuerdo con esta definición brota el proyecto SIRGAS, en el cual interviene un sistema de referencia y un Datum geocéntrico a través de redes geodésicas nacionales de cada país, apoyado de un Datum vertical en el cual se incluye la altura elipsoidal y la altura física, asimismo, se desarrolló por nivelaciones geométricas por todo el continente, siendo el sistema SIRGAS, una gran cantidad de factores que lo ubican como uno de los mejores sistemas de referencia regional.

En Colombia se estableció el Magna Sirgas como el marco geocéntrico nacional de referencia, donde se ha delegado al IGAC (Instituto Geográfico Agustín Codazzi) como el encargado de determinar, establecer y mantener los sistemas de referencia geodésicos del país, función que ha desempeñado con éxito desde hace más de 80 años, crear redes de estaciones GPS, con puntos o hitos materializados en tierra, pero teniendo en cuenta que Colombia está ubicada sobre la zona de choque de 3 placas tectónicas, con lo que se hace difícil calcular sus variaciones y siendo esta la principal razón para la creación de la Red Magna Eco, cuya función es suministrar coordenadas a los usuarios en tiempo real. *El Instituto Geográfico Agustín Codazzi, IGAC, es la entidad encargada de producir el mapa oficial y la cartografía básica de Colombia; elaborar el catastro nacional de la propiedad inmueble; realizar el inventario de las características de los suelos; adelantar investigaciones geográficas como apoyo al desarrollo territorial; capacitar y formar profesionales en tecnologías de información geográfica y coordinar la Infraestructura Colombiana de Datos Espaciales (ICDE) [7].*

Con el pasar de los años se ha pasado a tener un sistema geodésico local bidimensional, como el Datum Bogotá y su Red Arena, al tridimensional que se utiliza actualmente, como lo expresa la resolución 068 del 2005, en la cual se adopta como único Datum oficial de Colombia el Marco Geocéntrico Nacional de Referencia “Magna Sirgas”, donde se resuelve que:

Artículo 1º. Adoptase como único Datum oficial de Colombia el Marco Geocéntrico Nacional de Referencia, también denominado: MAGNA-SIRGAS.

Parágrafo 1º. MAGNA-SIRGAS es la densificación en Colombia de SIRGAS y a su vez del ITRF.

Parágrafo 2º. El modelo de geoide asociado al Datum MAGNA-SIRGAS será el producto denominado: GEOCOL 2004, que se adopta oficialmente por esta Resolución. Las versiones posteriores de este modelo de geoide serán nominadas teniendo en cuenta el año de su adopción oficial y las alturas basadas en los SGNS serán referidas adecuadamente a dicho modelo [8].

Después de esta resolución el país entro en una modernización al pasar de utilizar equipos ópticos a receptores GPS, como es el caso de la realización de nivelaciones geométricas, donde las poligonales de gran extensión tenían una dedicación amplia y el error humano era inevitable de compensar.

En conclusión, se cuenta con un marco geocéntrico precisó, definido bajo modelos físicos y matemáticos, combinados con técnicas de medición avanzadas. *Respecto a la actualización del marco de referencia ITRF, el impacto sobre el valor de la coordenada se asocia más a la aplicación de las velocidades horizontales*

(VEMOS) que a la aplicación de los parámetros de transformación entre ITRF. Puesto en vigencia el marco de referencia (MAGNA-SIRGAS), Colombia llevará su marco de referencia (Red Pasiva) a la última materialización del ITRF (2014), cumpliendo con los objetivos de la vinculación al GGRF [9].

La proyección cartográfica para Colombia es el sistema Gauss–Krüger, que representa el elipsoide sobre un plano utilizando usos de 1.5° a lado y lado del meridiano central y el UTM que utiliza usos de 6° y un factor de escala de 0.9996, tomado como origen la pilastra sur del observatorio de Bogotá y asignándole unos valores, se desplaza con orígenes complementarios de 3° y 6° de longitud Este y Oeste, lo que genera 6 orígenes a nivel nacional y miles de orígenes a nivel local, para minimizar las distorsiones en diferentes órdenes de magnitud, en términos de rumbos, distancias y áreas.

Esta conceptualización aplicada a las construcciones en obras de infraestructura como vías ha demostrado que en el país se han encontrado deformaciones mínimas en torno a la distancia de recorrido que se pueden corregir creando orígenes locales y asignando factores de escala combinados, para llegar a un acuerdo entre lo proyectado y lo materializado en campo. Pero se encontraría un mismo juego de coordenadas en todos los planos de proyección representado diferentes obras locales, lo que causaría gran controversia a la hora de realizar replanteos. *Las proyecciones Gauß-Krüger presentarán el mismo comportamiento en sus zonas de traslape, sin embargo, la facilidad de contar con solo seis representaciones para Colombia permite un mejor control y manejo por ejemplo en un ambiente SIG [10].* La proyección Gauss–Krüger, representa el mismo comportamiento en sus zonas de traslape, pero a diferencia de miles de orígenes solo cuenta con 6 orígenes que por supuesto es algo más manejable, pero que al igual cuando se acerca al extremo de una región con coordenadas aproximadas de 1.165.000 y cruza a la otra en 835.000 el usuario podría presentar confusión, que si no es especialista en el tema, hablando de un ingeniero civil con su topógrafo de campo, se va a encontrar con un dilema algo complejo.

Los amarres geodésicos y las correcciones en las deformaciones de los proyectos ingenieriles son tan fundamentales como su misma construcción y finalización, ubicando los proyectos exactamente en un punto de un plano de referencia, conociendo que la tierra es un geode achatado y que su graficacion en un plano se debe ajustar a medida que se aleja de su punto de origen. Una vez determinadas estas variables por las cuales se llevan muchos años de investigación y adopción a la misma, culturalizando a los usuarios para que formalicen sus procesos de ingeniería, el IGAC como principal administrador de estos sistemas da a conocer unas nuevas disposiciones:

El primero (01) de mayo de 2018 se presenta la propuesta de la proyección cartográfica única para la administración de tierras en Colombia, siendo el catorce (14) de mayo de 2020 aprobada por la resolución 471 de 2020 resolviendo en el artículo 4. Lineamientos técnicos generales: Todos los productos de la cartografía básica oficial deben cumplir con las siguientes especificaciones generales: Sistema de Referencia, Sistema de Referencia Horizontal y el marco geocéntrico de referencia es MAGNA-SIRGAS, establecido mediante resolución 068 de 2005, o aquel que lo modifique o lo sustituya. La proyección cartográfica será definida en un único origen de coordenadas, con los parámetros establecidos en la tabla 1 [11].

Tabla 1. Parámetros de la Proyección Única. Fuente: Instituto Geográfico Agustín Codazzi.

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

Modificada el cinco (05) de junio del presente año por la resolución 529 de 2020, resolviendo en esta última en el artículo 1. Adicionar un párrafo en el literal i. Sistema de referencia del artículo 4 sobre lineamientos técnicos generales, el cual queda así:

Parágrafo: 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, proyectos o actividades de posicionamiento a que haya lugar, para los cuales se aplicaran los parámetros de conversión correspondientes [12].

Según lo mencionado por estas dos resoluciones se encuentra un campo de acción único para esta proyección, el cual es el uso y la gestión de la información geográfica del país. Esto da a entender que él quiera utilizar dicha proyección lo puede realizar, y el que quiera continuar con las proyecciones habituales en nuestro territorio lo puede hacer.

Conociendo que el fin de utilizar la proyección cartografía con un único origen denominado “Origen Nacional” era la de facilitar el intercambio y la comprensión a nivel nacional como internacional. Pero desconociendo las alteraciones que se pueden tener a medida que nos alejamos del origen y que serán explicadas en el desarrollo del artículo.

Con la nueva implementación del origen único en Colombia se encuentra con una proyección que pasa de ser tangente a secante, que se podría tener la cobertura completa del país, con un juego de coordenadas único para cada punto, por consiguiente, para cada obra ingenieril, se eliminarían los saltos mencionados anteriormente de coordenadas, se simplificarían los datos, su administración y comprensión.

Esto ha despertado mucha incertidumbre y revuelo en los usuarios que acceden a esta información generando comentarios como los de la cámara colombiana de topografía, *Se debe hacer claridad que el nuevo origen CTM12 es el de menor precisión cartográfica, no cubre la totalidad del Territorio Nacional, deja por fuera la Plataforma Continental y el Mar Territorial incluidas todas sus islas y cayos, no se debe publicitar como “sistema único de coordenadas”, Esta afirmación confunde al público y a la comunidad geográfica [13].*

Para poder obtener una precisión adecuada para este estudio, se trabajó por el método de posicionamiento relativo estático, el cual nos ofrece precisiones sub decimales a la hora de realizar redes GNSS. Realizando el posicionamiento a 11 puntos de control distribuidos por todo el recorrido de la vía, aplicando los dos orígenes de estudio en su procesamiento, para con los resultados poder encontrar sus diferencias.

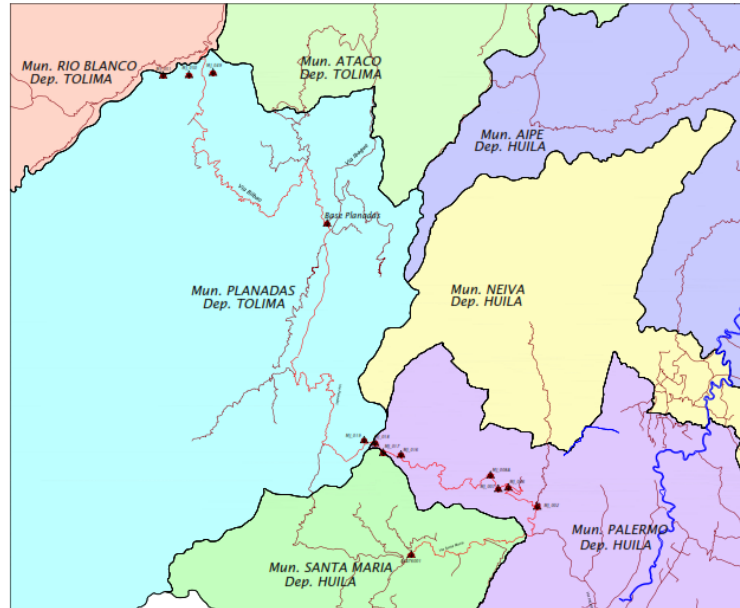
Respecto al objeto de estudio, se puede mencionar que es la vía existente que se encuentra ubicada en la República de Colombia entre los departamentos del Tolima y Huila, cruzando por los municipios de Planadas y Santa María, instalando 11 puntos de control para generar coordenadas fijas y precisas a cada uno y ser utilizados en la posterior construcción de la vía.

Esta vía presenta serias deficiencias en su estructura debido a que en ciertos tramos se han hecho incipientes mantenimientos superficiales desde que se les dio uso por primera vez, pero no se han hecho mantenimientos de fondo como lo son la elaboración de una estructura de pavimento que pueda dar un soporte idóneo a las diferentes solicitaciones de tránsito que se puedan tener en la zona a futuro.

Cabe destacar que cualitativamente estas vías tienen un TPD relativamente bajo debido a que estos municipios del Tolima y Huila no cuentan con mucha afluencia de turistas; sin embargo, está tomando una importancia a nivel regional debido a su creciente economía cafetera.

En la figura 1 puede observarse la distribución de los mojones a lo largo de la vía objeto de estudio y como interviene los dos departamentos.

Figura 1. Localización General. Fuente: Elaboración propia.



Los doce puntos de rastreo se encuentran distribuidos en su recorrido y su ubicación espacial cumple con el área de estudio de la presente investigación, al encontrarse en la zona de encuentro de dos orígenes como son Magna Colombia Bogotá y Magna Colombia Oeste. Para este ejemplo se utilizó el Magna Colombia Bogotá, como origen de comparación contra el Origen único CTM-12.

2. METODOLOGÍA

La monumentación permite establecer puntos de control precisos y fiables en el terreno, instalando 12 puntos geodésicos o de control a lo largo de la vía. Estos puntos sirvieron como referencias físicas que permiten obtener coordenadas precisas y están diseñados para ser estables a lo largo del tiempo.

Para obtener los niveles de precisión requeridos, para este artículo, se implementó el método cinemático relativo el cual realiza mediciones de diferencias de fase de dos o más receptores que simultáneamente rastrean varios satélites comunes, uno de los cuales reciben datos desde una posición conocida y los otros se sitúan en los puntos cuyas coordenadas se necesitan conocer, valorando previamente los parámetros de medición, como su intervalo de captura, el tiempo de medición, su máscara de elevación y la Dilución de Precisión de Posición (PDOP - Position Dilution of Precision), que representa la configuración geométrica de los satélites que se tienen al momento de realizar el posicionamiento. Para este caso la captura de datos se realizó cada cinco segundos, con una máscara de elevación de 10° sobre el horizonte y un PDOP máximo de 6, por las condiciones del terreno con los siguientes tiempos de medición y equipos doble frecuencia.

En la tabla 2 se muestran los datos de las sesiones realizadas para su posterior postproceso.

Tabla 2. Tabla de control de sesiones. Fuente: Elaboración propia.

PUNTO GPS	RECEPTOR	DIA JULIANO	HORA INICIO	HORA FIN	TIEMPO	TIPO ANTENA	TIPO DE MEDICION	ALTURA ANTENA (m)
41676001	LEICA 530	52	8:00:00	16:57:00	8:57:00	AT502	Palanca de la extensión v10	1.331
MJ_007	NAVCOM	52	8:40:00	10:27:00	1:47:00	NAVAN 2004T	Base del soporte de la antena	2
MJ_002	NAVCOM	52	15:16:00	16:44:00	1:28:00	NAVAN 2004T	Base del soporte de la antena	2.5
MJ_006	NAVCOM	52	8:20:00	10:20:00	2:00:00	NAVAN 2004T	Base del soporte de la antena	2.5
MJ_008A	LEICA 530	52	12:44:00	14:14:00	1:30:00	AT502	Base del soporte de la antena	2
41676001	LEICA 530	53	8:24:00	17:03:00	8:39:00	AT502	Palanca de la extensión v10	1.279
MJ_016	LEICA 530	53	9:22:00	10:52:00	1:30:00	AT502	Base del soporte de la antena	2
MJ_017	NAVCOM	53	9:35:00	11:21:00	1:46:00	NAVAN 2004T	Base del soporte de la antena	2.5
MJ_018	NAVCOM	53	9:40:00	11:23:00	1:43:00	NAVAN 2004T	Base del soporte de la antena	2
MJ_019	NAVCOM	53	14:00:00	15:31:00	1:31:00	NAVAN 2004T	Base del soporte de la antena	2
41676001	LEICA 530	54	14:01:00	19:02:00	5:01:00	AT502	Palanca de la extensión v10	1.287
BASE PLANADAS	LEICA 530	54	6:17:00	19:00:00	12:43:00	AT502	Base del soporte de la antena	2
BASE PLANADAS	LEICA 530	55	7:24:00	15:51:00	8:27:00	AT502	Palanca de la extensión v10	1.488
MJ_050	LEICA 530	55	11:54:00	14:14:00	2:20:00	AT502	Base del soporte de la antena	2
MJ_051	NAVCOM	55	9:16:00	11:16:00	2:00:00	NAVAN 2004T	Base del soporte de la antena	2.5
MJ_049	NAVCOM	55	12:26:00	14:28:00	2:02:00	NAVAN 2004T	Base del soporte de la antena	2.5

Con el propósito de hacer parte de un sistema geodésico nacional, todo posicionamiento satelital debe estar amarrado al sistema Magna Sirgas del Agustín Codazzi, por lo cual se hizo uso de la red geodésica nacional de datos coordinados y valores de altura nivelada. Utilizando el GPS 41676001, ubicado en el municipio de Santa María Huila cuyas coordenadas Geocéntricas Cartesianas son: X=1586404.063 m, Y=-

6170440.712 m, Z=325318.602 m, y sus velocidades son: $V_x=0.002$ m/año, $V_y=0.001$ m/año, $V_z=0.012$ m/año. Contando con altura sobre el nivel del mar de 1302.065 m. Los doce puntos que fueron objeto del estudio se encuentran ubicados dentro del recorrido de la vía existente entre el municipio de Planadas Tolima y Santa María Huila, contando con un área despejada para cada punto, sin construcciones elevadas ni obstrucciones de la vegetación.

Para el traslado de las coordenadas, según su época, se utilizó el programa Magna Pro 4.2, del Instituto Geográfico Agustín Codazzi, que permitió aplicar las velocidades del punto y replicarse a la época de estudio.

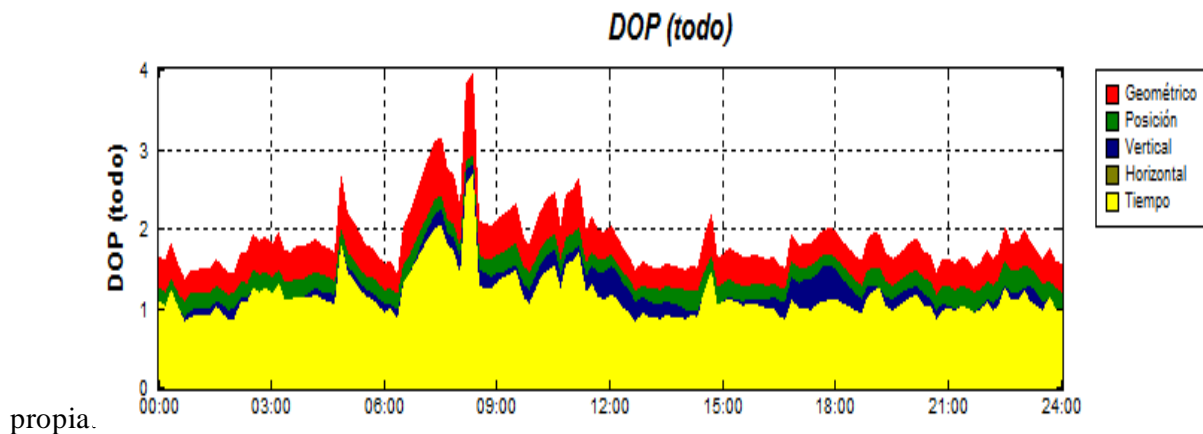
Figura 2. GPS 41676001 Red IGAC. Fuente: Elaboración propia.



La presente investigación tuvo los enfoques cualitativos y comparativos, dado que la resolución que pone en funcionamiento el origen único en Colombia es del 05 de junio del presente año, y lo que se pretende evaluar son las diferencias y deformaciones obtenidas al utilizar los 6 orígenes anteriores y el único origen nacional, con los mismos datos recolectados de la forma más precisa y exacta para obtener las coordenadas de los puntos.

El Software Trimble Business Center, cuenta con la utilidad QuikPlan que sirve para planificar y organizar las observaciones GPS de campo. Con esta utilidad se planearon las sesiones GNSS y se determinaron los períodos de observación óptimos para cada sesión, considerando los límites necesarios en el PDOP y las horas más adecuadas para realizar las sesiones.

Figura 3. Imagen Planning, programador de sesiones con el equipo Trimble Business. Fuente: Elaboración



Según la anterior grafica se pueden ver tres tipos de consideraciones donde se determina la hora más favorable en cuanto a la mayor disponibilidad de satélites para obtener los mejores valores de PDOP.

En la primera fase del proyecto se realizó la identificación del punto de coordenadas conocidas del IGAC más cercano, que cuentan con todas las cualidades óptimas para realizar la labor. Se realizó el recorrido por la vía, para ubicar los mojones previamente fundidos y adecuar su entorno con respecto a la vegetación de la zona.

Para que la información de cada sesión resultara ordenada y clara en cada estación ocupada, se recopilieron los datos que identificaron las mediciones en cada una de ellas (nombre del proyecto, numero de sesión, fecha, nombre del observador, altura de la antena, seriales del equipo, nombre de la estación, monografía del vértice, croquis de ubicación, entre otras).

Durante la segunda fase se inició con las sesiones de los puntos MJ_007, MJ_002, MJ_006 y MJ_008A, desde el GPS 41676001, con dos equipos NAVCOM STARFIRE y dos equipos LEICA 530, con un promedio de grabación de 1 hora y 52 minutos, con distancias promedio de 9986 metros, aplicando la fórmula de $T=65+3(D-10)$, donde la única variable es la distancia.

Al día siguiente continuamos con las sesiones de los puntos MJ_016, MJ_017, MJ_018 y MJ_019, desde el mismo GPS 41676001, con dos equipos NAVCOM STARFIRE y dos equipos LEICA 530, con un promedio de grabación de 1 hora y 38 minutos, con distancias promedio de 9424 metros.

Al tercer día se realizó el reconocimiento de los puntos, pero se habían encontrado con unas condiciones topográficas muy adversas, presentándose un tramo de vía con mucha vegetación y encajonada dentro de las montañas, lo que había dificultado cualquier técnica de medición y su precisión, por tal motivo se realizó un traslado de base al municipio de planadas con un tiempo de grabación de 5 horas por su distancia de 28770 ml y se aseguró una buena calidad del punto por su duración extendida del rastreo.

El cuarto y último día en campo se efectuaron los trabajos en las sesiones de los puntos MJ_050, MJ_051 y MJ_049, desde la BASE PLANADAS, con un promedio de grabación de 2 horas y una distancia promedio de 17202 ml. Con estas labores se culminó la cobertura de todo el proyecto pasando al post-proceso en oficina.

Figura 4. Actividades de medición en campo. Fuente: Elaboración propia.



En la fase 3, se había iniciado con la descarga de la información recolectada en campo, se procedió a convertir los archivos crudos a formato Rinex (acrónimo de receiver independent exchange), el post-proceso se realizó con software Trimble Business Center (Versión 2.4), serial de llave T2015, que cuenta con amplias características para el procesamiento como son el procesamiento de alta precisión para medidas de pseudo distancia de L1 y L2, ajuste de redes topográficas (módulo Network Adjustment), procesamiento de datos topográficos convencionales y GNSS, y se finalizó con el seguro y control de calidad de datos (SC/CC). Test estadísticos como el Chi cuadrado Test ($\alpha=95\%$) y controles de calidad de las mediciones (como el RMS, Varianza y Ratio) permiten chequear los resultados de las mediciones y el procesamiento, importación y exportación de datos topográficos, transformaciones de Datum y proyecciones, y diversidad de selección en cuanto a modelos Troposféricos y ionosféricos en el procesamiento.

Tabla 3. Parámetros Geodésicos Bogotá Magna. Fuente: Elaboración propia.

Sistema de Coordenadas	BOGOTA_MAGNA
Proyección	Transversa de Mercator
Datum	WGS-84
Elipsoide	GRS-80
Semi-eje mayor	6378137 m
Achatamiento	1/298.25722356300
Origen de Coordenadas	Bogotá
Geoide	Geocol 2004
Latitud	04° 35' 46.3215" N
Longitud	74° 04' 39.0285" W
Falso Este	1.000.000.00
Falso Norte	1.000.000.00
Factor de Escala	1.0000000
Unidades	Metros

El control Geodésico ha consistido en establecer a través de toda la zona del programa puntos o marcas con coordenadas precisas con respecto a un Datum Geodésico Geocéntrico (WGS84).

Por medio del Modelo Gravitacional Terrestre GEOCOL 2004 se han calculado las alturas referidas al Nivel Medio del Mar de toda la Red Geodésica, este modelo se ha aplicado porque se ha adaptado mejor a las alturas ortométricas.

Tabla 4. Parámetros Geodésicos CTM-12. Fuente: Elaboración propia.

Sistema de Coordenadas	CTM-12
Proyección	Transversa de Mercator
Datum	WGS-84
Elipsoide	GRS-80
Semi-eje mayor	6378137 m
Achatamiento	1/298.257222356300
Geoide	Geocol 2004
Latitud	04° N
Longitud	73° W
Falso Este	5.000.000.00
Falso Norte	2.000.000.00
Factor de Escala	0.9992
Unidades	Metros

3. RESULTADOS

Por el editor de sesiones se habían depurado todos aquellos ruidos que registra la información, al realizar esta desinfección se ha reducido el RMS (Root Mean Square), y se ha mejorado la calidad de nuestra información, obteniendo soluciones fijas entre los vectores procesados, otorgando precisiones menores a 2 centímetros en la horizontal y menores a 10 centímetros en la vertical, teniendo en cuenta que la topografía del sector y su vegetación son un factor que dificulta la buena recepción de las señales GPS.

Para poder establecer las diferencias entre los dos procesos se muestran las precisiones alcanzadas en cada sesión en las siguientes tablas.

Tabla 5. Resultados sesión del primer día con el equipo Trimble Business. Fuente: Elaboración propia.



Observación	De	A	Tipo de solución	Prec. H. (Metro)	Prec. V. (Metro)	Aci. geod.	Dist. elip (Metro)	ΔAltura (Metro)
GPS 41676001 --- MJ002 (B65)	GPS 41676001	MJ002	Fija	0.009	0.06	68°59'56"	11353.42	-211.238
GPS 41676001 --- MJ006 (B67)	GPS 41676001	MJ006	Fija	0.009	0.05	55°12'44"	9936.244	286.754
MJ006 --- MJ007 (B68)	MJ006	MJ007	Fija	0.005	0.015	262°38'51"	843.914	93.169
GPS 41676001 --- MJ007 (B70)	GPS 41676001	MJ007	Fija	0.013	0.066	52°47'20"	9195.444	379.884
GPS 41676001 --- MJ008A (B71)	GPS 41676001	MJ008A	Fija	0.019	0.096	44°50'53"	9448.353	493.918
Resumen de aceptación								
Procesado	Pasado	Indicador		Fallida				
5	5	0		0				

Tabla 6. Resultados sesión segundo día con el equipo Trimble Business. Fuente: Elaboración propia.



Observación	De	A	Tipo de solución	Prec. H. (Metro)	Prec. V. (Metro)	Aci. geod.	Dist. elip (Metro)	ΔAltura (Metro)
MJ018 --- MJ016 (B76)	MJ018	MJ016	Fija	0.015	0.097	114°21'34"	2396.725	-220.133
GPS 41676001 --- MJ016 (B72)	GPS 41676001	MJ016	Fija	0.007	0.045	354°06'14"	8466.974	1348.093
GPS 41676001 --- MJ019 (B78)	GPS 41676001	MJ019	Fija	0.011	0.097	337°35'01"	10420.29	1510.385
GPS 41676001 --- MJ017 (B74)	GPS 41676001	MJ017	Fija	0.007	0.044	344°33'11"	8903.504	1450.324
MJ017 --- MJ016 (B73)	MJ017	MJ016	Fija	0.005	0.035	96°04'12"	1510.103	-102.235
GPS 41676001 --- MJ018 (B77)	GPS 41676001	MJ018	Fija	0.013	0.097	342°01'32"	9893.653	1568.189
Resumen de aceptación								
Procesado		Pasado		Indicador			Fallida	
6		6		0			0	

Tabla 7. Resultados sesión tercer día con el equipo Trimble Business. Fuente: Elaboración propia.



Observación	De	A	Tipo de solución	Prec. H. (Metro)	Prec. V. (Metro)	Aci. geod.	Dist. elip (Metro)	ΔAltura (Metro)
BASE PLANADAS --- 41676001 (B72)	41676001	BASE PLANADAS	Fija	0.016	0.096	345°41'31"	28761.74	-76.653
Resumen de aceptación								
Procesado		Pasado		Indicador			Fallida	
1		1		0			0	

Tabla 8. Resultados sesiones 4 día con el equipo Trimble Business. Fuente: Elaboración propia.





Observación	De	A	Tipo de solución	Prec. H. (Metro)	Prec. V. (Metro)	Aci. geod.	Dist. elip (Metro)	ΔAltura (Metro)
BASE PLANADAS --- MJ050 (B75)	BASE PLANADAS	MJ050	Fija	0.012	0.082	316°57'57"	17074.59	241.531
MJ050 --- MJ049 (B76)	MJ050	MJ049	Fija	0.006	0.032	84°30'54"	2032.837	-91.736
BASE PLANADAS --- MJ049 (B77)	BASE PLANADAS	MJ049	Fija	0.013	0.075	322°46'36"	15917.33	149.74
BASE PLANADAS --- MJ051 (B78)	BASE PLANADAS	MJ051	Fija	0.014	0.089	311°58'05"	18595.59	226.783
Resumen de aceptación								
Procesado		Pasado		Indicador			Fallida	
4		4		0			0	

Tabla 9. Criterios de aceptación. Fuente: Elaboración propia.

Componente del Vector	Indicador 	Fallida 
Precisión horizontal >	0.050 m + 1.000 ppm	0.100 m + 1.000 ppm
Precisión vertical >	0.100 m + 1.000 ppm	0.200 m + 1.000 ppm

Como se puede evidenciar, en los resultados anteriores, las sesiones cumplieron con sus tiempos de grabación, número de satélites, y demás condiciones que establecen a un punto de buena calidad con el tipo de solución “Fija”, y se han obtenido precisiones siempre por debajo de 0.050 m en horizontal y de 0.100 m en vertical, como se aprecia en la tabla 9.

La validez de los resultados se basó en el término de compensación, lo cual mejora la calidad de la información por el método de mínimos cuadrados, *Este método, utiliza comúnmente para analizar una serie de datos que se obtengan de algún estudio, con el fin de expresar su comportamiento de manera lineal y así minimizar los errores de la data tomada* [14].

De este punto en adelante se realizó el cálculo con los dos orígenes de estudio, con esto se ha asegurado que el proceso de la información es el mismo, solo se reprocesan los datos con orígenes diferentes.

Cuando hablamos de cálculo y compensación de redes GNSS (GPS) nos referimos en general al hecho de calcular las coordenadas del proyecto o red, o lo que es lo mismo, a calcular las coordenadas de un conjunto de puntos materializados en el terreno. Una de las tareas más importantes de la Geodesia y Topografía [15].

En las siguientes tablas se encuentran las coordenadas finales de los puntos después de realizar los ajustes necesarios y comprobaciones internas, en ellas se muestran las coordenadas de la estacione base, es decir del punto que sirvió como coordenada conocida del Agustín Codazzi para dar coordenadas a los demás y que se considera libre de error.

Tabla 10. Coordenadas Finales Bogotá_Magna con el equipo Trimble Business. Fuente: Elaboración propia.

Información del Proyecto			
Sistema de Coordenadas: BOGOTA_MAGNA			
Proyección: Transversa de Mercator			
Datum: WGS 1984			
Geoide: Colombia Geoide 2004			
Lista de puntos			
ID	Este (Metro)	Norte (Metro)	Elevación (Metro)
GPS 41676001	832757.403	817274.080	1302.065
MJ002	843365.603	821329.925	1092.744
MJ006	840928.132	822933.870	1589.982
MJ007	840090.754	822826.928	1682.960
MJ008A	839431.987	823965.917	1796.660
MJ016	831898.840	825700.372	2649.336

MJ017	830396.898	825862.216	2751.344
MJ018	829716.105	826692.354	2869.095
MJ019	828795.557	826915.825	2811.126
BASE PLANADAS	825685.956	845163.677	1223.103
MJ049	816073.093	857858.375	1372.034
MJ050	814048.382	857667.395	1463.448
MJ051	811873.546	857625.392	1448.311

Tabla 11. Coordenadas Finales CTM-12 con el equipo Trimble Business. Fuente: Elaboración propia.

Información del Proyecto			
Sistema de Coordenadas: CTM-12			
Proyección: Transversa de Mercator			
Datum: WGS 1984			
Geoide: Colombia Geoide 2004			
Lista de puntos			
ID	Este (Metro)	Norte (Metro)	Elevación (Metro)
GPS 41676001	4713118.503	1883515.022	1302.065
MJ002	4723729.131	1887559.970	1092.744
MJ006	4721293.611	1889166.057	1589.982
MJ007	4720456.254	1889059.954	1682.960
MJ008A	4719798.706	1890199.423	1796.660
MJ016	4712268.298	1891941.093	2649.336
MJ017	4710766.701	1892104.407	2751.344
MJ018	4710086.814	1892935.122	2869.095
MJ019	4709166.596	1893159.483	2811.126
BASE PLANADAS	4706075.996	1911408.488	1223.103
MJ049	4696477.582	1924112.284	1372.034
MJ050	4694452.816	1923923.519	1463.448
MJ051	4692278.084	1923883.881	1448.311

Las coordenadas finales CTM-12 fueron comprobadas con la herramienta en línea que ofrece el IGAC en su plataforma, donde se obtuvieron resultados idénticos a las del post-proceso. *Este servicio en línea le permitirá realizar el proceso de conversión de coordenadas de un punto específico y de un conjunto de datos disponible en diferentes formatos. Este servicio soporta los Datum MAGNA-SIRGAS, WGS84 y Bogotá, así como distintas proyecciones cartográficas, como TM, Gauss-Krüger con sus diferentes orígenes [16].*

Con el resultado final de las coordenadas ajustadas se procedió a su graficación en el programa AutoCAD, se configuró sus sistemas de coordenadas y se realizó la medición de 2 aspectos en general; las distancias entre vectores, siendo el GPS 41676001 y BASE PLANADAS sus puntos de partida y la distancia de recorrido total.

Tabla 12. Diferencias entre Vectores con el equipo Trimble Business. Fuente: Elaboración propia.

DISTANCIA DE VECTORES					
PUNTO	VECTOR	CTM-12	BOGOTA MAGNA	DIFERENCIAS (m)	DISTANCIA MAS CORTA EN LA SUPERFICIE DE UNA ESFERA POR FORMULA DE VINCENTRY
		DH EN PLANO (m)	DH EN PLANO (m)		
GPS 41676001	MJ002	11355.495	11357.103	1.608	11350.444
	MJ006	9938.148	9939.519	1.371	9946.814
	MJ007	9197.230	9198.487	1.257	9207.707
	MJ008A	9450.212	9451.495	1.283	9469.645
	MJ016	8468.859	8469.919	1.060	8513.681
	MJ017	8905.533	8906.630	1.097	8949.021
	MJ018	9895.930	9897.140	1.210	9942.622
	MJ019	10422.725	10423.985	1.260	10468.365
BASE PLANADAS	BASE PLANADAS	28768.775	28772.122	3.347	28910.629
	MJ049	15922.185	15923.646	1.461	15968.725
	MJ050	17079.939	17081.455	1.516	17177.264
MJ051	18601.554	18603.145	1.591	18631.184	

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

En la anterior tabla se muestran las distancias de cada vector, con respecto a sus puntos base, se han obtenido diferencias de 1 a 2 metros en distancias promedio de 10 kilómetros y de 3.347 metros en el traslado de la base a planadas. Se ha evidenciado un promedio de 0.12 metros por kilómetro recorrido, lo que en distancias tan largas se nota algo redundante, pero que al final no es una diferencia estrepitosa teniendo en cuenta que toda abstracción de la realidad genera distorsiones. La última columna muestra la distancia más corta en la superficie de la esfera por la fórmula de Vincenty, que se podría usar como comparación, la cual es una fórmula que utiliza un modelo esférico, pero que no es de mayor precisión a la WGS-84, que se utiliza actualmente. *La solución de Vincenty para la distancia entre puntos en un modelo terrestre elipsoidal tiene una precisión de 0,5 mm de distancia (!), 0,000015 " de rumbo, en el elipsoide que se está utilizando. Los cálculos basados en un modelo de tierra esférica, como él (mucho más simple) Haversine, tienen una precisión de alrededor del 0,3%, lo que sigue siendo lo suficientemente bueno para muchos [17].*

Tabla 13. Diferencias en recorrido total con el equipo Trimble Business. Fuente: Elaboración propia.

DISTANCIA DE RECORRIDO				
PUNTO	VECTOR	CTM-12	BOGOTA MAGNA	

		DH EN PLANO (m)	DH EN PLANO (m)	DIFERENCIAS (m)
MJ002				
	MJ006	2917.4086	2917.8596	0.451
MJ006				
	MJ007	844.0525	844.1792	0.1267
MJ007				
	MJ008A	1315.5831	1315.7773	0.1942
MJ008A				
	MJ016	7729.1952	7730.2418	1.0466
MJ016				
	MJ017	1510.4519	1510.6367	0.1848
MJ017				
	MJ018	1073.4681	1073.5959	0.1278
MJ018				
	MJ019	947.1742	947.2845	0.1103
MJ019				
	BASE PLANADAS	18508.8625	18510.9082	2.0457
BASE PLANADAS				
	MJ049	15922.1853	15923.6457	1.4604
MJ049				
	MJ050	2033.5461	2033.6981	0.152
MJ050				
	MJ051	2175.0932	2175.2416	0.1484
RECORRIDO TOTAL		54977.0207	54983.0686	6.0479

La distancia de recorrido es una variable determinante a la hora de establecer los costos de construcción de una vía. Con una diferencia de 6 metros aproximadamente en un recorrido de 55 kilómetros aproximados, se puede ver un promedio de 0.11 m por kilómetro recorrido.

5. CONCLUSIONES

Este artículo se desarrolló en medio de la controversia generada entre varias partes en las cuales unas estaban de acuerdo y otras en desacuerdo con la implementación de este nuevo origen nacional, aunque el IGAC ha sido claro en que su uso es principalmente para el intercambio de información, no descarta la utilización del mismo en los diferentes procesos topográficos. Partiendo del punto en que toda deformación de la realidad causa distorsión en los datos, se puede concluir que este nuevo origen nacional es el menos preciso de los orígenes utilizados en este momento, pero por este motivo no lo hace erróneo, y si son muchos los puntos a favor que trae su implementación. La contribución que se aporta con este artículo de investigación es el de probar que el nuevo origen nacional es una muy buena opción a la hora de realizar trabajos con datos geoespaciales, manteniendo los estándares locales.

Las diferencias encontradas entre el proceso con los dos orígenes son mínimas hablando de 0.11 m por kilómetro de recorrido, en un trazado de una vía de esta magnitud, para lo favorable en que se puede convertir el trabajar con un solo par de coordenadas para cada punto representado en nuestro país.

El proyecto se encuentra ubicado en la zona de encuentro de dos orígenes según el sistema MAGNA_COLOMBIA, los cuales son el MAGNA_BOGOTA y el MAGNA_OESTE, lo que dificulta la comprensión y administración de datos para un proyecto tan grande. Si se aplica el origen único nacional CTM-12, se encontrará un valor único de coordenadas para cada punto en el territorio nacional.

Todo sistema de coordenadas genera una distorsión de la realidad, pero para trabajos donde las precisiones sean muy rigurosas, el MAGNA_COLOMBIA, con sus 6 orígenes, continúa siendo más preciso que el origen único nacional CTM-12.

La fácil graficación del CTM-12 en áreas mayores es un aspecto muy importante que elimina los saltos de coordenadas del MAGNA_COLOMBIA.

Según la resolución 529 de 2020, queda abierta la posibilidad de la utilización de cualquiera de los dos parámetros de conversión de acuerdo con necesidad de cada profesional.

El origen único nacional CTM-12 genera una distorsión del 0.09% y 0.05% en distancias inferiores a 3000 metros.

Los dos sistemas están basados en la proyección Transversa de Mercator, donde se utilice el mismo Datum WGS-84 y geoide Geocol 2004.

Para evitar coordenadas negativas en el Origen único nacional CTM-12 se asignaron valores E=5.000.000 y N=2.000.000, al punto de la mediatriz del territorio nacional.

Valorando las deformaciones que generan las distancias entre dos puntos se asigna un factor de escala $K=0.9992$, donde en los extremos se alarga y en el centro se reduce.

Las distorsiones en altura entre los dos sistemas son mínimas, por esta razón no se consideran.

El proyecto de investigación se encuentra ubicado a 295 km al Oeste del origen central CTM-12, se tienen que revisar sus deformaciones alejándose más de dicho origen, pero conociendo que su deformación aumentara entre más distancia.

La intención del IGAC como el encargado de determinar, establecer y mantener los sistemas de referencia geodésicos en nuestro país, es generosa a la hora de mejorar la comunicación entre el usuario y el servidor, su intercambio de información con otros países y su organización e los procesos de formalización de la tierra, desde el punto de vista de la ingeniería puede ser una solución viable en proyectos viales con distancias de recorrido cortas y manejando debidamente las transformaciones, sin alterar significativamente sus dimensiones.

El correcto uso de las transformaciones geodésicas se debe aplicar con los equipos adecuados para esta función de acuerdo a su nivel de precisión, en este caso puntual se utilizaron los equipos GPS de alta precisión y los métodos estáticos adecuados para certificar sus precisiones y poder tener resultados serios.

En la construcción de una vía con esta distancia de recorrido y dificultad de su entorno se tiene que ser muy riguroso con la toma de la información, adicionalmente, se deben contar con redes de GPS amarradas y distribuidas de manera más continua, para controlar cualquier distorsión con la realidad.

AGRADECIMIENTOS

En el caso del autor Saieth Baudilio Chaves Pabón, se menciona que es producto resultado de su ejercicio académico como profesor de la Universidad Militar Nueva Granada. Adicionalmente, los autores dan crédito a la Universidad Militar Nueva Granada por el apoyo recibido en el desarrollo de esta investigación y en la realización de este documento científico.

REFERENCIAS

- [1] Project Management. (2020) OBS Business School. [Online]. <https://obsbusiness.school/es/blog-project-management/noticias/cuales-son-las-etapas-de-ejecucion-de-un-proyecto-de-obra-civil>
- [2] Instituto Geográfico Nacional. (2018, septiembre) Instituto Geográfico Nacional. [Online]. <https://www.ign.es/web/ign/portal/gds-teoria-geodesia>
- [3] E., Montilla, A. y Valero Agüero, "Medición de puntos GPS por el método," *TED*, p. 139, 2018.
- [4] Uson, "Realización de un posicionamiento con GPS," Mexico D.F., 2015.
- [5] Agencia Federal de Cartografía y Geodesia. (2013) International Earth Rotation and Reference Systems Service. [Online]. https://www.iers.org/IERS/EN/Home/home_node.html
- [6] Agencia Federal de Cartografía y Geodesia. (2013) International Earth Rotation and Reference Systems Service. [Online]. <https://www.iers.org/IERS/EN/Science/ITRS/ITRS.html>
- [7] IGAC Instituto Geográfico Agustín Codazzi. (2018, May) IGAC. [Online]. <https://www.igac.gov.co/es/contenido/que-hacemos#:~:text=El%20Instituto%20Geogr%C3%A1fico%20Agust%C3%ADn%20Codazzi,geogr%C3%A1ficas%20como%20apoyo%20al%20desarrollo>
- [8] INSTITUTO GEOGRÁFICO AGUSTÍN CODAZZI, RESOLUCIÓN 068, Enero 28, 2005.
- [9] Diego Cortés. Luis Gómez. Francisco Mora. (2018) Sirgas. [Online]. http://www.sirgas.org/fileadmin/docs/Boletines/Bol22/05_Cortes_et_al_2017_Implementacion_Actualizacion_MAGNA-SIRGAS.pdf
- [10] D. Salvini and F.A. Bolívar. (2018, Mayo) Propuesta de la Proyección Cartográfica única para la Administración de Tierras en Colombia Versión 2.0. [Online]. https://www.cpnt.gov.co/images/pdf/Documentos_técnicos_y_Publicaciones/CTM12_Proposal_v2-2018.06.01_compressed.pdf
- [11] Olga Lucia Lopez Morales, Resolución No. 471 de 2020, Mayo 14, 2020.
- [12] Olga Lucia Lopez Morales, Resolución No. 529 de 2020, junio 05, 2020.
- [13] José Agustín Wilches Gómez. (2020, June) CPNT. [Online]. https://www.cpnt.gov.co/images/pdf/OR%C3%8DGEN_CARTOGR%C3%81FICO_CTM12.pdf

- [14] miprofe.com. (2018) miprofe.com. [Online]. <https://miprofe.com/minimos-cuadrados/>
- [15] Natalia Garrido-Villén. (2017, Abril) Natalia Garrido-Villén. [Online]. <https://nagarvil.webs.upv.es/calculo-compensacion-redes-gnss-gps-12/>
- [16] Instituto Geográfico Agustín Codazzi. (2020, Junio) Instituto Geográfico Agustín Codazzi. [Online]. <https://origen.igac.gov.co/herramientas.html>
- [17] Vincenty soluciones de geodésicas en el elipsoide. (2018) Vincenty soluciones de geodésicas en el elipsoide. [Online]. <https://www.movable-type.co.uk/scripts/latlong-vincenty.html>