

Generación de Planos Topográficos Locales (PTL) aplicando el Método Modelaje 3D en la
Poligonal Chocontá - Suesca

Neeck Yeins Sánchez Forero

Andrés Felipe Bolívar Marín

Universidad Distrital Francisco José de Caldas
Facultad de Medio Ambiente y Recursos Naturales
Proyecto Curricular de Ingeniería Topográfica
Bogotá D.C.

2016

Generación de Planos Topográficos Locales (PTL) aplicando el Método Modelaje 3D en la
Poligonal Chocontá - Suesca

Neeck Yeins Sánchez Forero	20122032752
Andrés Felipe Bolívar Marín	20122032745

Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de:

Ingeniero Topográfico

Director del Proyecto:

Ingeniero Raúl Orlando Patiño Pérez

Universidad Distrital Francisco José de Caldas
Facultad de Medio Ambiente y Recursos Naturales
Proyecto Curricular de Ingeniería Topográfica
Bogotá D.C.

2016

Artículo 117

La universidad Distrital Francisco José de Caldas no será responsable de las ideas de los graduandos en el trabajo de grado.

© Únicamente se puede usar el contenido de las publicaciones para propósitos de información. No se debe copiar, enviar, recortar, transmitir o redistribuir este material para propósitos comerciales sin la autorización de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Cuando se use el material de la Universidad se debe incluir la siguiente nota “Derechos reservados a la Universidad Distrital Francisco José de Caldas” en cualquier copia en un lugar visible. Y el material no se debe notificar sin el permiso de la Universidad.

Publicado en 2015 por la Universidad Distrital Francisco José de Caldas Facultad de Medio Ambiente y Recursos

Naturales Avenida Circunvala Venado de Oro Bogotá. Colombia

TEL: 3239300 Ext: 4023 - 4024, e-mail: ingtopografica@udistrital.edu.co

Nota De Aceptación

Acuerdo 29 de 1988 Reglamento Estudiantil

El comité de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas aprueba el trabajo de grado titulado “GENERACIÓN DE PLANOS TOPOGRÁFICOS LOCALES (PTL) APLICANDO EL MÉTODO DE ROTACIONES Y TRASLACIONES, EN LA POLIGONAL CHOCONTÁ – SUESCA” en cumplimiento con todos los requisitos para obtener el título de INGENIERO TOPOGRÁFICO.

Firma del Director

Firma del Evaluador

Bogotá DC – Colombia. 2016.

Universidad Distrital Francisco José de Caldas

Agradecimientos

El presente proyecto de grado es un esfuerzo en el cual directa o indirectamente participaron distintas personas proporcionando opiniones, aportes técnicos y conceptuales, correcciones y ánimo. Por eso es imprescindible agradecer en primer lugar a nuestros padres, ya que nos enseñan día a día los valores íntegros para el progreso personal y profesional, y que será la mejor herencia que nos podrán dejar.

Por otra parte expresar nuestros más sinceros agradecimientos al director de proyecto el Ingeniero Raúl Orlando Patiño, el cual se encargó de guiarnos y brindarnos su apoyo y conocimientos en el proceso de elaboración y correcciones de éste proyecto de grado.

También cabe resaltar el apoyo de los Ingenieros Gelson Dal'Forno de la Universidad Federal de Santa María y Carlos Rodríguez de la Universidad Distrital, ya que sus aportes fueron de gran importancia para el desarrollo y culminación del presente proyecto.

Gracias a todos.

Contenido

	Pág.
Generalidades	8
1.Marco de Referencia.....	10
1.1. Modelamiento Tridimensional de Datos Espaciales.	10
1.2. Superficies de Referencia.....	11
1.2.1. Modelo Geoidal	11
1.2.2. Modelo Plano.....	13
1.2.4. Modelo Esférico	16
1.3. Sistemas de Coordenadas.....	17
1.3.1. Sistema de Coordenadas Cartesianas Elipsoidales.	17
1.3.2. Sistemas de Coordenadas Geodésicas.	18
1.3.3. Sistemas de Coordenadas Locales	21
1.3.4. Modelamiento de Planos Topográficos Locales Utilizando en Modelaje 3D o Software Transgeolocal	23
1.3.5. Factor de Ampliación y Reducción de Distancia.	26
2.Metodología	28
2.2. Definición del Origen para el Plano Topográfico Local.....	31
2.3. Aplicación Modelaje 3D.	33
2.4. Aplicación Método Instituto Geográfico Agustín Codazzi IGAC.....	33

3.Resultados 36

4.Análisis de resultados 43

5.Conclusiones 50

Tabla De Ecuaciones 51

Contenido De Tablas 52

Tabla De Figuras..... 53

Referencia 54

Generalidades

La incorporación de nuevas tecnologías aplicadas a la Topografía y Geodesia, proporcionan como resultado la optimización del trabajo en terreno como de procesamiento de la información, permitiendo generar precisiones superiores a las obtenidas por otros métodos, lo que conlleva a fortalecer y mejorar los estándares calidad en los productos generados.

Las diferentes herramientas utilizadas para la representación espacial de sistema tridimensional como lo es el Sistema de Posicionamiento Global están referidos en su mayoría al centro de masas de la tierra, lo cual facilita la representación georreferenciada en la superficie terrestre, donde varios autores como por ejemplo Oliveira (2004), Jekeli (2006), Burkholder (1997), Dal'Forno et al. (2008, 2009, 2010), Brum (2008), Mónico (2008), han utilizado coordenadas tridimensionales para realizar transformaciones entre el sistema topográfico y sistemas geodésicos aplicando rotaciones y traslaciones entre los mismos, lo anterior se han denominado Métodos de Modelamiento Geodésico tridimensional.

El Proyecto de investigación se ejecutará cumpliendo con especificaciones y metodologías rigurosas, documentadas y coherentes con el objetivo planteado, de tal manera que la información topográfica de la poligonal será calculada desde la propuesta metodológica planteada por un grupo de docentes investigadores adscritos a la Universidad Federal de Santa María de Brasil, la cual se denomina modelaje 3D.

Se tiene una hipótesis inicial, que posiblemente la generación de Planos Topográficos Locales (PTL) es el método que remedia las inconsistencias observadas en los proyectos de grandes dimensiones, donde se realizan mediciones que combinan diferentes metodologías para la obtención de información topográfica utilizando equipos topográficos como lo son estaciones totales o de posicionamiento global, en donde se puede tener discrepancias que puede ser causadas (posiblemente) porque se trabajan en planos de proyección cartográfico distintos y no se cuenta con metodologías concisas o técnicas rigurosas, basadas en un sustento matemático y científico para la solución de esta dificultad.

Este trabajo se desarrolló con el propósito de aportar en la búsqueda de una propuesta fruto de investigación para la generación de Planos Topográficos Locales PTL como solución a las inconsistencias evidenciadas en los proyectos topográficos que requieren altas precisiones, por lo anterior se busca una solución aplicable en las condiciones del entorno y que se beneficie la comunidad Académica, Topográfica e Ingenieril Colombiana, generando Planos Topográficos Locales.

Se realizará un análisis comparativo con el método utilizado por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi IGAC - Sistema de Coordenadas Planas Cartesianas Origen Local y el método de modelaje 3D, en los vértices que forman la Poligonal Chocontá – Suesca.

1. Marco de Referencia

1.1. Modelamiento Tridimensional de Datos Espaciales.

El modelamiento tridimensional de datos espaciales consiste en el manejo de información compuesta por datos espaciales (valga la redundancia) que contienen coordenadas cartesianas tridimensionales y que utilizando modelos matemáticos permiten transformar dichas coordenadas y a su vez admite realizar un análisis de la misma.

La utilización del modelamiento 3D provee un ambiente digital, dentro del cual, los resultados obtenidos al realizar las transformaciones pueden ser utilizados para un sin número de aplicaciones sin los densos procesos que dicta la geodesia tradicional, ya que al tratar de establecer el Sistema Geodésico Curvilíneo presenta mayor grado de dificultad que al hacerlo utilizando el Sistema Cartesiano.

Dentro del modelamiento tridimensional se encuentran inmersas las ecuaciones de la geodesia geométrica y las reglas de la geometría sólida que se relacionan con varios sistemas de coordenadas y que (Leick, 1997) enmarca en el modelo geodésico tridimensional.

Para entender de manera correcta del funcionamiento del modelamiento 3D se hace necesario tener conocimientos previos sobre topografía, matemáticas y geodesia, como por ejemplo: sistemas de referencia, superficies de referencia, sistemas de coordenadas, transformaciones de coordenadas, etc.

1.2. Superficies de Referencia

Partiendo de la dificultad que tiene tratar representar la tierra por su forma y dimensiones, en las ciencias afines a las ciencias de la tierra como la geodesia y la topografía, se emplean cuatro modelos de representación de la tierra, como lo son: el modelo geoidal, el modelo plano, el modelo esférico y el modelo elipsoidal.

1.2.1. Modelo Geoidal

Según el (NGS, 2001) geoide es: “la superficie equipotencial del campo de gravedad de la Tierra que mejor se ajusta, en el sentido de los mínimos cuadrados, al nivel medio global de los mares”. Esta definición no es perfecta, pues existe una indefinición del nivel del mar en las regiones próximas de los polos, debido a las alteraciones en el transcurrir de los últimos años.

La utilidad principal del geoide es establecer la superficie de referencia de la altura ortométrica, conocida también como altura sobre el nivel medio del mar y se aplica en trabajos de Ingeniería, Topografía, Cartografía, GPS, apoyo terrestre para fotografía aérea y como un insumo para la generación de Modelos Digitales de Elevación.

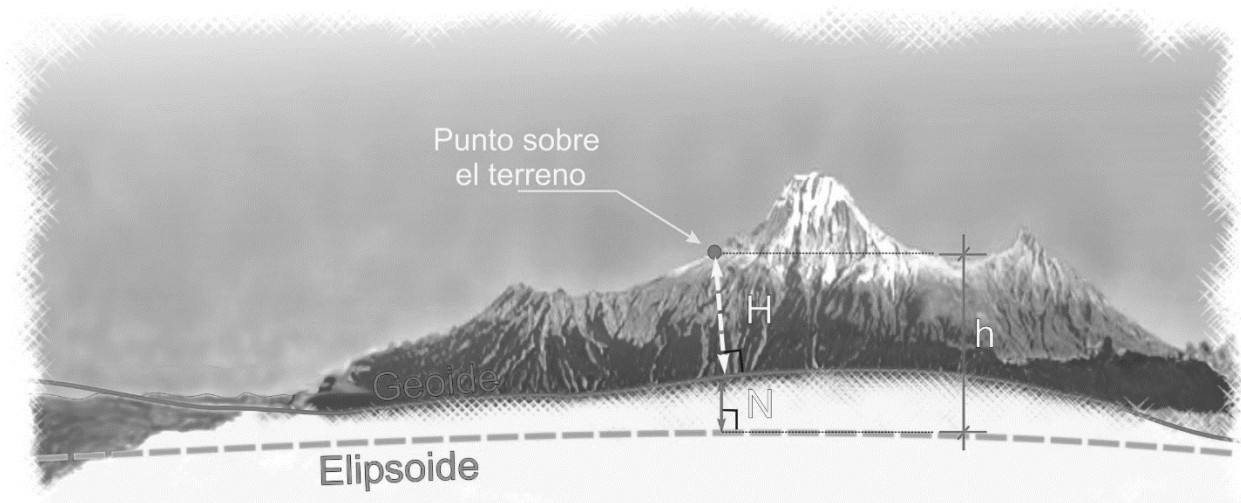
Combinando información de un modelo de alturas geoidales con alturas geodésicas obtenidas mediante técnicas de posicionamiento satelital es posible obtener alturas ortométricas de cualquier punto sobre el terreno. La manera de transformar el valor de altura geodésica (h) que proporciona

un receptor GPS en un valor de altura ortométrica (H), es mediante la resta del valor de altura Geoidal (N) dada por un modelo digital de elevación geoidal.

Ecuación 1 Altura Ortométrica

$$H = h - N$$

Ilustración 1 Ondulación Geoidal (N), Altura Ortométrica (H) y Altura Elipsoidal (h). (INEGI, 2012)



Para el caso concreto de Colombia, el Instituto Geográfico Agustín Codazzi -IGAC-, entidad gubernamental encargada de los sistemas geodésicos nacionales de referencia, generó el GEOCOL2004, (Leick, 1997) geoide – cuasi geoide actualizado para su utilización en el MAGNA (Marco Geocéntrico Nacional de Referencia) - SIRGAS (Sistema de Referencia Geocéntrico para las Américas)

1.2.2. Modelo Plano

En la Topografía y en la Cartografía las representaciones gráficas son planas y materializadas por medio de planos, cartas y mapas. Esas representaciones poseen sesgos y deformaciones inherentes a los sistemas de proyección, que son controladas y definen la limitación de la representación gráfica, tanto en el plan topográfico como en las proyecciones cartográficas (Dal’Forno, Aguirre, Hillebrand, & Gregorio, 2010)

1.2.2.1. Proyecciones Cartográficas

La necesidad de lograr representar la superficie de la tierra en un plano fue lo que llevó a que las proyecciones cartográficas pudiesen ser desarrolladas, logrando así obtener la relación bidimensional de las posiciones terrestres usando latitudes y longitudes, y a su vez, las equivalencias de ellas en coordenadas planas usadas en un mapa.

Colombia no ha sido la excepción a la aceptación mundial que ha tenido la Proyección UTM (Universal Transversa de Mercator), y el Instituto Geográfico Agustín Codazzi ha avalado su utilización en la resolución 0399 de 2011. El UTM divide el elipsoide en 60 husos, separados 6° de longitud entre sí, enumerados a partir del meridiano 180° en sentido anti horario. Y en el caso de las latitudes, sus usos están delimitados a 84° Norte y 80° Sur. El origen de las coordenadas planas se encuentra en la intersección del Ecuador con el meridiano céntrico del huso.

La altura ortométrica (H) junto con las coordenadas X e Y o Norte y Éste no definen un sistema tradicional rectangular. Las proyecciones acordes son propiamente definidas en dos dimensiones, sin contemplar una definición matemática para las altitudes. La superficie de referencia para altitud es una superficie irregular llamada geoide y la integridad del modelo tridimensional rectangular se preserva solo mientras se asume la tierra plana. Así pues, cuando se asume la altitud junto a las coordenadas geográficas se considera un sistema coordenado pseudo tridimensional. (Burkholder, 1997)

Un aspecto muy importante es que cuando se utilizan coordenadas planas, la diferencia entre la distancia UTM y la distancia horizontal real puede ser bastante considerable como para ser ignorada, para ello se debe establecer un factor de elevación y por ende un plano de proyección topográfica en el cual, dicha diferencia se transforme en una que pueda ser obviada. Esto requiere la estandarización de procedimientos en los cuales el Instituto Geográfico Agustín Codazzi ya ha hecho su labor, generando un modelo que ayuda en ello.

1.2.2.2. Plano Topográfico Local

El Plano Topográfico Local o PTL surge como una manera de solucionar la discrepancia entre las mediciones de terreno y la cartografía sobre un plano de proyección, que suele ser LTM (Local Transversa de Mercator), tal que el plano de proyección sea coincidente con el terreno. Para poder llevarlo a cabo se debe considerar un cilindro que pase por el terreno topográfico, constituyendo de esa manera un Plano Topográfico Local.

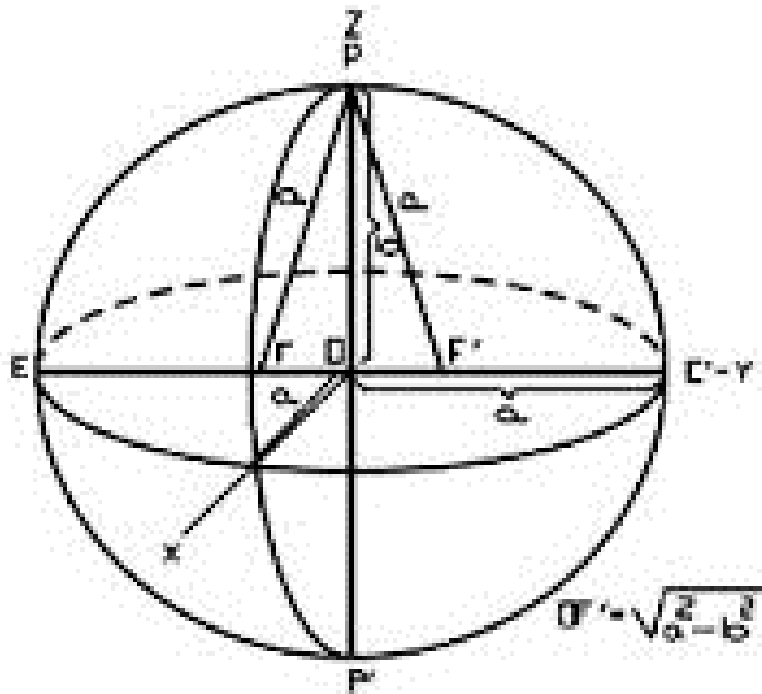
Ese plano es perpendicular a la vertical de un punto en la superficie terrestre (origen del levantamiento) y pudiendo también ser perpendicular a la normal. En el caso de la determinación de coordenadas topográficas a partir de coordenadas geodésicas, son orientadas por el azimut geodésico (Dal’Forno, Aguirre, Hillebrand, & Gregorio, 2010).

1.2.3. Modelo Elipsoidal

El elipsoide de revolución es un sólido geométrico generado por la rotación de una elipse en su eje más pequeño. Es la figura geométrica que más se acomoda para las operaciones geodésicas, además fue adoptada como superficie de referencia para la tierra y sobre ella se realizan todos los cálculos que requiere la geodesia.

Éste modelo es el que más se asemeja a la tierra en su movimiento de rotación, dicho movimiento genera principalmente la fuerza centrífuga y es contraria a la fuerza de atracción gravitacional de la tierra. Ésta interacción propician deformaciones en los elementos de masa.

Ilustración 2 Elipsoide de Revolución (Gstatic.com, s.f.)



Fuente: Adaptado de Zanetti (2006, p. 11).

1.2.4. Modelo Esférico

Éste modelo concibe la tierra como una esfera, despreciado el achatamiento (f) en los polos (a pesar de que no es muy acertado en la forma real de la Tierra) es muy bueno para realizar ciertas aproximaciones. El uso de éste modelo hace que los cálculos geodésicos sean mucho más sencillos ya que minimiza la energía potencial de la atracción gravitacional entre los elementos de masa y la dirección de la gravedad está determinada hacia el centro de la tierra (Clynch, 2006).

1.3. Sistemas de Coordenadas

Para la georreferenciación geodésica de puntos, son utilizados dos tipos de sistemas de coordenadas, el Sistema de Coordenadas Cartesianas (Rectangulares) y el Sistema de Coordenadas Curvilíneas. Ambas formas de representación están referidas a un sistema de referencia o al elipsoide de referencia, según sea el caso.

Al realizar levantamientos geodésicos, la posición de un punto en el espacio euclidiano tridimensional se determina por coordenadas astronómicas o elipsoidales. El primero de ellos utiliza los sistemas definidos en el espacio gravitacional terrestre y el segundo, utilizan los sistemas definidos en el espacio geométrico. Si se habla del sistema astronómico, la posición se define por unas coordenadas geográficas astronómicas (Φ, Λ) y su correspondiente altura elipsoidal (H), pero en el sistema elipsoidal se utilizan coordenadas geográficas elipsoidales (φ, λ) y la altura elipsoidal (h). En ambos sistemas dichos posicionamientos pueden ser expresados en términos de coordenadas planas cartesianas o PTL (X, Y, Z).

1.3.1. Sistema de Coordenadas Cartesianas Elipsoidales.

El modelado 3D se encuentra basado en un sistema cartesiano rectangular tridimensional dextrógiro con el origen en el centro de masas de la tierra o también denominado como geocéntrico. Fue definido por la Agencia de Defensa y Mapeamiento de Estados Unidos (DMA) como ECEF

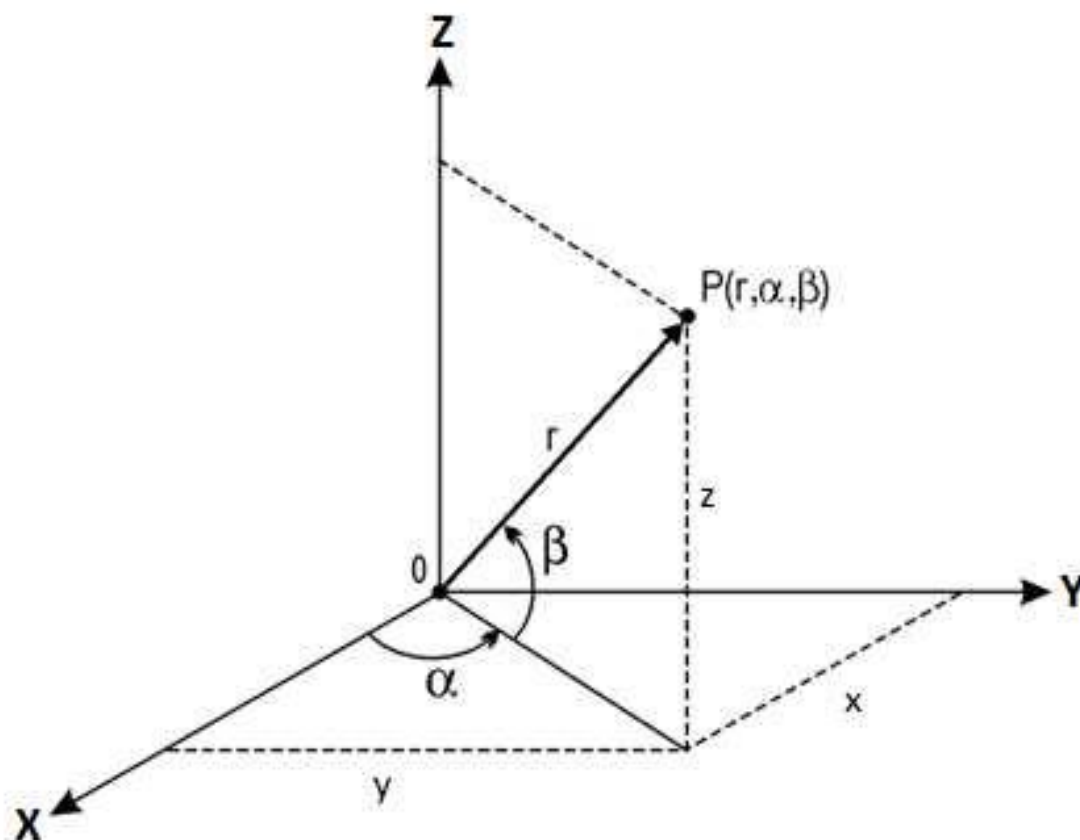
(Earth Centered – Earth Fixed), utilizado de manera amplia por todos quienes trabajan con datos GPS y afines.

El sistema de coordenadas cartesiano tridimensional (X, Y, Z) es constituido por tres ejes perpendiculares con su origen en la intersección de los ejes de la elipse y localizado en el centro de masas de la Tierra. El plano formado por los ejes cartesianos X e Y coincide con el plano ecuatorial. El eje X es definido por el origen del sistema de coordenadas y el punto generado por la intersección del plano Ecuatorial y el meridiano de Greenwich (en Este es positivo). El eje Y, también situado en el plan ecuatorial, es ortogonal al eje X y positivo en la dirección Éste (Y). El eje Z es paralelo al eje medio de rotación de la Tierra definido por el Polo Convencional Terrestre, y positivo en la dirección del norte. (Dal’Forno, Aguirre, Hillebrand, & Gregorio, 2010).

1.3.2. Sistemas de Coordenadas Geodésicas.

El sistema de coordenadas curvilíneas representa la posición de los puntos en el espacio a través de la latitud (φ), longitud (λ) y de la altura elipsoidal (h), cuando es adoptado el elipsoide como superficie de referencia (Ilustración 3), o (r, α, β) cuando es adoptada la esfera como superficie de referencia (Ilustración 4).

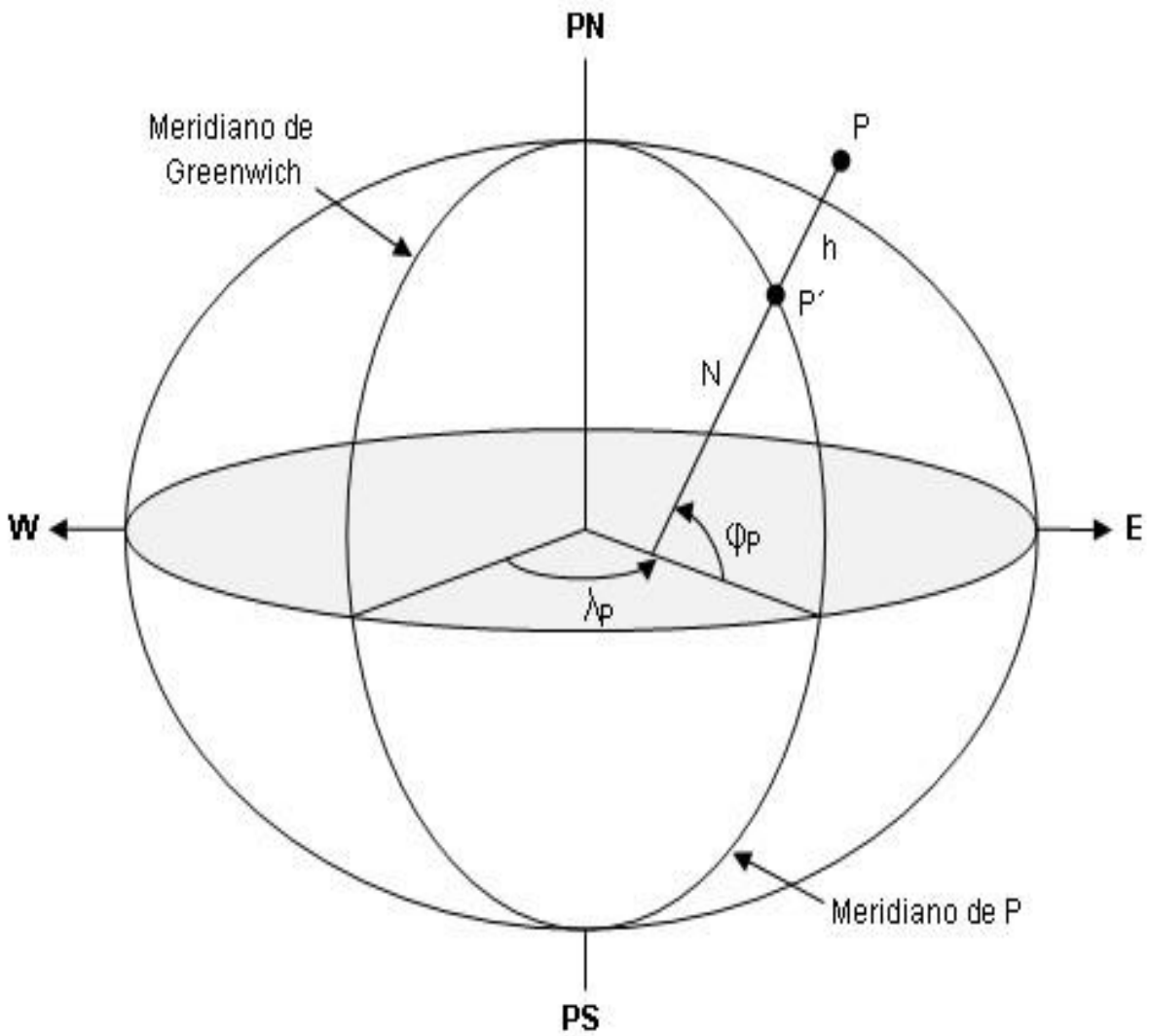
Ilustración 3 Representación de las coordenadas curvilíneas elipsoidales (φ , λ) y altura elipsoidal (h) del punto P .



Fuente: Adaptado de Zanetti (2006, p. 13).

La latitud elipsoidal es el ángulo formado entre la normal (N) que pasa por el punto y su proyección en el plano ecuatorial, con valores de 0° a 90° , Norte (+) o Sur (-). La longitud geodésica es el ángulo formado en el plano ecuatorial, entre el meridiano de Greenwich y el meridiano que pasa por el punto considerado, con valores de 0° a 180° , Éste (+) y Oeste (-).

Ilustración 4 Representación del sistema de coordenadas curvilíneas esféricas del punto P.



Fuente: Adaptado de Zanetti. (2006, p. 06).

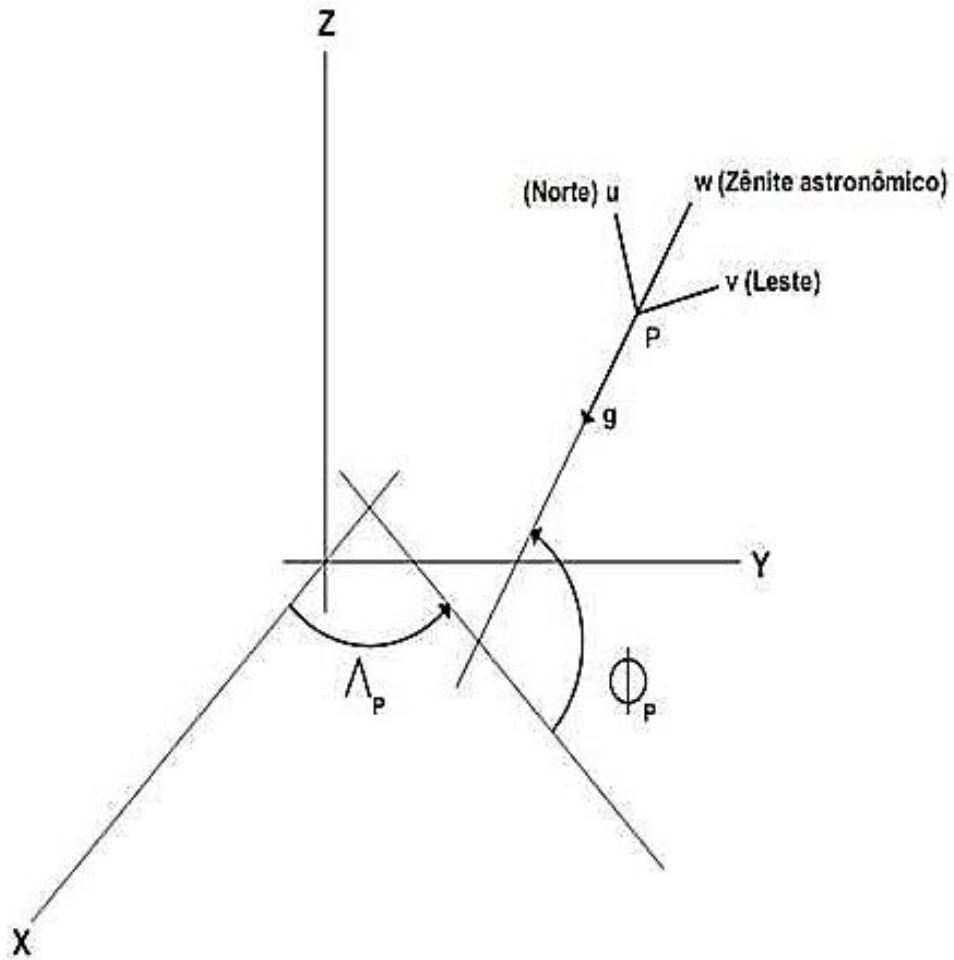
1.3.3. Sistemas de Coordenadas Locales

Los Sistemas Coordenados Locales localizados sobre un Plano Topográfico Local o PTL se componen por 3 ejes ortogonales entre sí. Brinda apoyo a los trabajos topográficos tridimensionales locales, donde se obtienen medidas angulares y de distancia utilizando diferentes instrumentos para obtenerlas.

La orientación de la convención de los ejes varía según el área de estudio, para el caso de la topografía se utilizan Norte (u), Este (v), Altura (w), y en navegación se usan Norte (N), Éste (Y), Sur (S), Oeste (W).

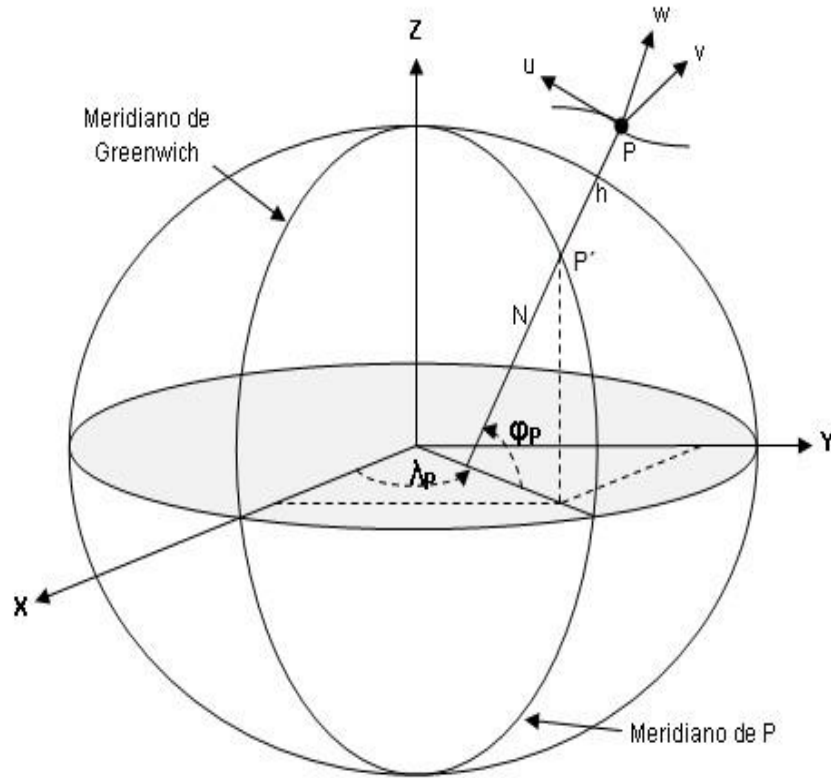
Los ejes u y v son perpendiculares entre sí y se sitúan en el plano topográfico, y el eje w es perpendicular a este plano. En cuanto a la orientación, el eje u es direccionado al norte astronómico o al norte geodésico, el eje v es direccionado para el éste y el eje w coincide con la dirección de la vertical o de la normal al elipsoide que pasa por el punto considerado como origen del sistema (Dal’Forno, Aguirre, Hillebrand, & Gregorio, 2010). Las direcciones w pueden situarse sobre la normal o sobre la vertical. Cuando la perpendicular al plan de proyección (PTL) sea la vertical del lugar se constituye un Sistema Astronómico Local (SAL). Cuando esa perpendicular sea normal al elipsoide es denominado de Sistema Geodésico Local (SGL) (Dal’Forno, Aguirre, Hillebrand, & Gregorio, 2010). El desarrollo matemático es idéntico para ambos sistemas. La única diferencia es la especificación de la latitud y longitud, eso es la dirección de la vertical empleada. Las ilustraciones 5 y 6 muestran el sistema de coordenadas astronómicas (Φ, Λ) y el sistema astronómico local (v, u, w) asociados a un punto en la superficie terrestre.

Ilustración 5 Representación del sistema de coordenadas astronómicas (Φ , Λ) y del sistema de coordenadas astronómicas locales (v , u , w) del punto P .



Fuente: Adaptada de Jekeli (2006, p. 2-49)

Ilustración 6 Sistema de Coordenadas Geodésicas (φ, λ) y el Sistema Geodésico Local (v, u, w) asociados a un punto en la superficie terrestre.



Fuente: Adaptada de Zanetti (2006, p. 13).

1.3.4. Modelamiento de Planos Topográficos Locales Utilizando en Modelaje 3D o Software Transgeolocal

Las fórmulas presentadas a continuación, permiten la transformación de coordenadas geodésicas en Coordenadas Planas rectangulares dentro Plano Topográfico Local (PTL). En la aplicación de las fórmulas, se consideran la latitud (φ) negativa en el hemisferio sur y la longitud (λ) positivamente para oeste. Los coeficientes C y D son negativos en el hemisferio sur, y el eje de

las ordenadas es el eje de los Y y de las abscisas es el eje X, conforme la NBR 14.166 (ABNT, 1998, p. 15) y que son las base sobre las cuales el programa TRANSGEOLocal realiza los cálculos respectivos para obtener en Plano Topográfico Local.

Ecuación 2 Planos Topográficos Locales Utilizando en Modelaje 3D

$$\begin{aligned}
 X_p &= 150000 + x_p \\
 Y_p &= 250000 + y_p \\
 x_p &= -(\Delta\lambda_1 \cdot \cos \varphi_p \cdot N_p \cdot \text{arc1}^- \cdot c) \\
 y_p &= \frac{1}{B} \cdot [\Delta\varphi_1 + Cx_p^2 + D \cdot \Delta\varphi_1^2 + E \cdot \Delta\varphi_1 \cdot x_p^2 + E \cdot Cx_p^4] \cdot c \\
 \Delta\lambda &= \lambda_p - \lambda_0 \\
 \Delta\varphi &= \varphi_p - \varphi_0 \\
 \Delta\lambda_1 &= \Delta\lambda^- \cdot [1 - 3,9173 \cdot 10^{-12} \cdot \Delta\lambda^{-2}] \\
 \Delta\varphi_1 &= \Delta\varphi^- \cdot [1 - 3,9173 \cdot 10^{-12} \cdot \Delta\varphi^{-2}] \\
 B &= \frac{1}{M_0 \cdot \text{arc1}^-} \\
 C &= \frac{\tan \varphi_0}{2 \cdot M_0 \cdot N_0 \cdot \text{arc1}^-} \\
 D &= \frac{3 \cdot e^2 \cdot \text{sen} \varphi_0 \cdot \cos \varphi_0 \cdot \text{arc1}^-}{2 \cdot (1 - e^2 \cdot \text{sen}^2 \varphi_0)} \\
 E &= \frac{1 + 3 \cdot \tan \varphi_0}{6 \cdot N_0^2} \\
 c &= \frac{R_0 + H_t}{R_0} \\
 R_0 &= \sqrt{(M_0 \cdot N_0)} \\
 M_0 &= \frac{a \cdot (1 - e^2)}{(1 - e^2 \cdot \text{sen}^2 \varphi_0)^{3/2}} \\
 N_0 &= \frac{a}{(1 - e^2 \cdot \text{sen}^2 \varphi_0)^{1/2}} \\
 N_p &= \frac{a}{(1 - e^2 \cdot \text{sen}^2 \varphi_p)^{1/2}}
 \end{aligned}$$

Dónde:

M_0 : es el radio de curvatura de la sección meridiana del elipsoide de referencia en P_0 .

N_0 : es el radio de curvatura de la sección meridiana del elipsoide de referencia en P_0 .

N_p : es el radio de curvatura de la sección meridiana del elipsoide de referencia en P .

C : es el factor de elevación.

H_t : es la altitud ortométrica media del terreno o altitud del plano topográfico local.

En este proceso de cálculo, se aplica el factor de elevación (c) a las coordenadas de los puntos de apoyo geodésico que definen el PTL. Éste factor eleva el plano al Nivel Medio del Terreno del área de alcance del PTL (Zanetti, 2006, p. 62). La NBR 14.166/98 establece el límite de desnivel máximo de 150 metros en el área a ser representada, manteniéndose el error inferior a $1/40.000$ debido al factor de reducción o ampliación de las distancias horizontales. Establece aún, la necesidad de subdividir el PTL en sistemas parciales y menores que 50 km, en relación al PTL adoptado, cuando los desniveles sean superiores al límite estipulado (*Dal Forno*, 2010, p. 04).

Para la transformación de coordenadas geodésicas en coordenadas topográficas locales, por el método de modelaje 3D, en la misma escala las fórmulas matemáticas son dadas por Andrade (1998, p. 98), Jekeli (2006, p. 2-49 a 2-53) y aún por Mónico (2008, p. 151). La ecuación para la transformación es dada por:

Ecuación 3 Matriz Rotación y Traslación

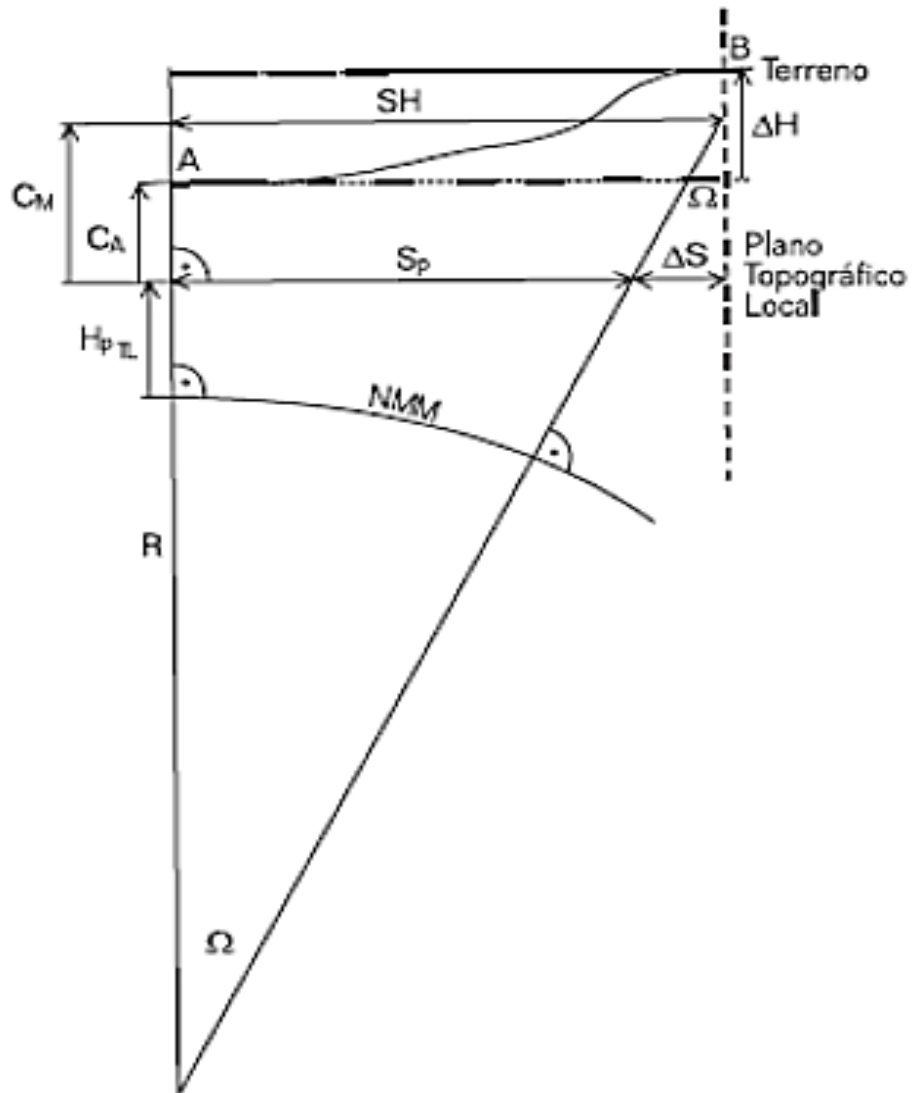
$$\begin{bmatrix} v \\ u \\ w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \text{sen } \varphi_0 & \text{cos } \varphi_0 \\ 0 & -\text{cos } \varphi_0 & \text{sen } \varphi_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \text{sen } \lambda_0 & \text{cos } \lambda_0 & 0 \\ -\text{cos } \lambda_0 & -\text{sen } \lambda_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} X - X_0 \\ Y - Y_0 \\ Z - Z_0 \end{bmatrix}$$

Dónde v (Este), u (Norte), w (Elevación) son las coordenadas topográficas transformadas en el plano topográfico local; φ_0 , λ_0 son la latitud y la longitud del punto de origen del sistema; X, Y, Z son las coordenadas geodésicas cartesianas del punto a transformar; X_0 , Y_0 , Z_0 son las coordenadas geodésicas cartesianas tridimensionales del punto de origen para el sistema.

1.3.5. Factor de Ampliación y Reducción de Distancia.

Aunque el área representada esté dentro de los límites del PTL, el efecto de la altura del PTL y de los desniveles del mismo requiere un factor de corrección para las distancias horizontales. Así, como se observa en la siguiente figura, la distancia horizontal media (SH) entre los puntos A y B del terreno es proyectada como SP en el plan del horizonte del PTL, que tiene como altura Ht (HPTL). Por ser representadas en el PTL, las distancias horizontales son afectadas por un factor de reducción o ampliación (ΔS), cuya magnitud depende de la altura media al PTL (CM), de la distancia horizontal entre los puntos y, en más pequeña relación, del valor de Ht. La adopción de un plano medio envuelve criterios que relacionan las distancias máximas y los desniveles máximos que se encuentran en el área.

Ilustración 7 Representación de las reducciones de distancia cuando se emplea el PTL. Dónde: ΔS es el factor de reducción o ampliación; CM es la cota media; SH es la distancia horizontal proyectada sobre el plano medio; R es radio medio de curvatura y ΔH altura del PTL



Fuente: Adaptada de Fuentealba, et al. (2006 Dal Forno, 2010, p. 04).

2. Metodología

Para el desarrollo de este Proyecto de Investigación se generaron Planos Topográficos Locales aplicando dos metodologías, la primera fue desarrollada en Colombia por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi - IGAC que a través de su software Magna Sirgas Pro (*disponible en www.igac.gov.co*) se puede realizar los cálculos correspondientes a la transformación y conversión de coordenadas y el segundo, propuesto por el grupo de investigación de la Universidad Federal de Santa María en el documento “Transformación de Coordenadas Geodésicas en Coordenadas Locales – Comparación entre la Norma NBR14166:1998 y el Modelaje 3D realizado por Gelson Lauro Dal Forno y Argentino José Aguirre plasmado en el programa de computador Transgeolocal V2.0 (*disponible en www.ufsm/geo-giap*).

2.1. Levantamiento Topográfico.

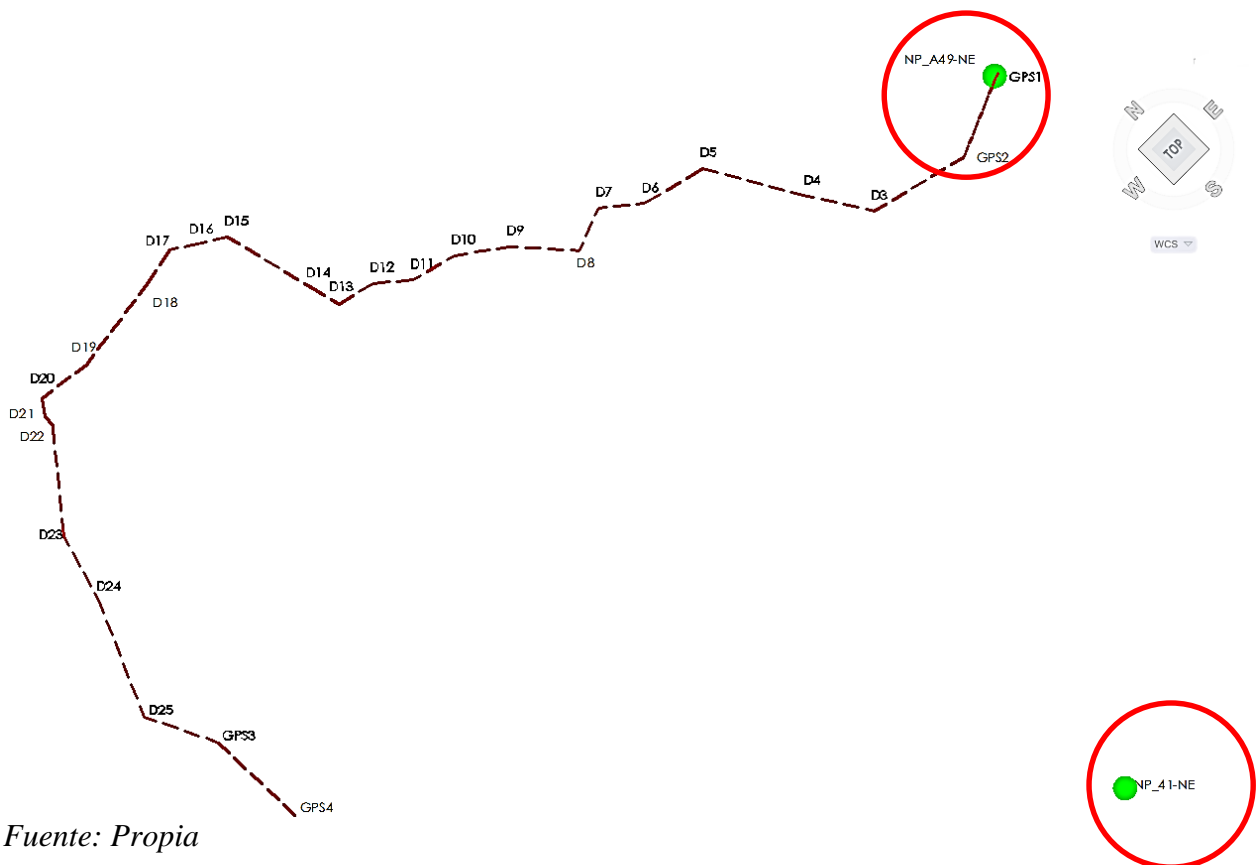
Se realizaron dos actividades fundamentales para capturar los datos iniciales de esta poligonal, la primera de ellas consta de un levantamiento topográfico con estación total (ésta información fue suministrada de manera secundaria por el Ingeniero Orlando Patiño) y la segunda fue el Posicionamiento GPS de los vértices de la poligonal en mención. De este modo, se obtuvo una información sólida y certera para realizar el proceso y análisis comparativo de los Planos Topográficos Locales generados a partir de la metodología definida anteriormente.

En el posicionamiento GPS o también llamado Posicionamiento Geodésico se utilizaron equipos de doble frecuencia marca Trimble y referencia 5700. En campo se situaron los equipos

de la siguiente manera: un equipo GPS en el punto denominado NP_A49-NE y otro en el punto NP_41-NE, ésto con el fin de ser la base fija para el levantamiento con equipos de iguales características en ambos puntos, adicionalmente dos equipos GPS doble frecuencia marca Trimble y referencia 5700 como Rover, posicionando con un tiempo de rastreo mínimo de 45 minutos en cada uno de los vértices que componen la poligonal.

En la siguiente ilustración se observa la ubicación de los puntos utilizados como base para el posicionamiento geodésico y la distribución de los vértices de la poligonal.

Ilustración 8 Ubicación de los vértices que forman la poligonal.



Fuente: Propia

Una vez obtenida la información del levantamiento geodésico se realizó el correspondiente post-proceso y ajuste de coordenadas utilizando el software Leica Geo Office. Obteniendo las siguientes coordenadas geodésicas.

Tabla 1 Coordenadas WGS 84 - Vértices Poligonal

Punto / Vértice	Altura Elipsoidal (m)	Latitud	Longitud
NP_A49-NE	2652.8333	5° 09' 00.26776" N	73° 40' 48.15530" W
GPS-1	2654.9494	5° 09' 00.21974" N	73° 40' 46.62515" W
GPS-2	2671.8260	5° 08' 46.04695" N	73° 41' 20.43868" W
DELTA-3	2702.6216	5° 08' 56.68637" N	73° 42' 01.58581" W
DELTA-4	2784.5096	5° 09' 20.49766" N	73° 42' 16.40584" W
DELTA-5	2920.9320	5° 09' 58.39533" N	73° 42' 38.06286" W
DELTA-6	2898.1800	5° 10' 05.05423" N	73° 43' 04.82907" W
DELTA-7	2859.1400	5° 10' 17.25945" N	73° 43' 19.18565" W
DELTA-8	2867.9582	5° 10' 10.59461" N	73° 43' 36.94697" W
DELTA-9	2932.1689	5° 10' 31.83463" N	73° 43' 55.64476" W
DELTA-10	2974.4278	5° 10' 45.29693" N	73° 44' 14.04312" W
DELTA-11	3019.5044	5° 10' 50.12997" N	73° 44' 32.82454" W
DELTA-12	2983.4250	5° 11' 00.95955" N	73° 44' 45.29810" W
DELTA-13	2972.8483	5° 11' 04.62528" N	73° 45' 01.00686" W
DELTA-14	2946.3942	5° 11' 15.22955" N	73° 45' 03.59334" W
DELTA-15	2870.7141	5° 11' 56.15069" N	73° 45' 13.53116" W

Punto / Vértice	Altura Elipsoidal (m)	Latitud	Longitud
DELTA-16	2889.5752	5° 12' 03.98599" N	73° 45' 25.85974" W
DELTA-17	2887.8409	5° 12' 09.18050" N	73° 45' 33.63550" W
DELTA-18	2875.7186	5° 12' 05.88878" N	73° 45' 50.51021" W
DELTA-19	2877.9343	5° 12' 00.49998" N	73° 46' 30.48066" W
DELTA-20	3064.1394	5° 12' 03.68563" N	73° 46' 52.95441" W
DELTA-21	3065.3612	5° 11' 57.66163" N	73° 46' 57.03297" W
DELTA-22	3058.5603	5° 11' 52.94796" N	73° 46' 57.62633" W
DELTA-23	2873.5197	5° 11' 17.95825" N	73° 47' 26.42156" W
DELTA-24	2929.4137	5° 10' 48.80661" N	73° 47' 35.14323" W
DELTA-25	2974.3152	5° 10' 03.18727" N	73° 47' 55.51053" W
GPS-3	2883.7758	5° 09' 34.49593" N	73° 47' 41.75113" W
GPS-4	2979.2539	5° 08' 51.48717" N	73° 47' 40.63842" W
NP_41-NE	2733.4354	5° 04' 59.20195" N	73° 43' 35.99598" W

2.2. Definición del Origen para el Plano Topográfico Local.

El Centroide se define básica y concretamente como el centro geométrico de una figura u objeto. No siempre el origen de los Planos Topográficos Locales debe ser un punto físicamente materializado, y por tal motivo se definió un punto en común X e Y iguales en todos los PTL's a generar, obteniendo de este modo una longitud equidistante desde el origen del PTL a todos los vértices de la poligonal con el objetivo de comparar las proyecciones de los puntos.

En la determinación de la elevación para el origen del PTL, se realizó una comparación de las alturas de los vértices de la poligonal, obteniendo una diferencia de 410.412 metros, luego de ello, se realizó un análisis estadístico a éstos valores y se obtuvo una elevación media aritmética de 2900.500 m.s.n.m y media geométrica de 2902.473 m.s.n.m, concluyendo que estos valores se encuentran aproximadamente a 40 metros por encima de la altura media del terreno, es decir, la elevación obtenida estadísticamente no es equidistante a las alturas de los vértices de la poligonal. Así, la altura media del terreno obtenida del promedio entre la altura más alta y la más baja es de 2860.155 m.s.n.m y es la apropiada para los PTL's de éste proyecto.

El valor asignado a las coordenada del origen de los PTL's corresponde a la transformación de las coordenadas geográficas Latitud 5° 10' 27.64636", Longitud 73° 44' 21.03454" W y Elevación 2860.155 m.s.n.m. a coordenadas Magna Sirgas Origen Central.

Tabla 2 Coordenadas Origen Plano Topográfico Local

Coordenadas Geocéntricas		
X	Y	Z
1779512.609	-6100940.866	571645.685
Coordenadas Geográficas WGS 84		
Latitud	Longitud	Elevación
5° 10' 27.64636" N	73° 44' 21.03454" W	2860.155 m.s.n.m.
Coordenadas Plano Topográfico Local		
Norte	Este	Elevación
1063942.702 m	1037510.662 m	2860.155 m.s.n.m.

2.3. Aplicación Modelaje 3D.

Éste método establece un parámetro importante en la generación de PTL's, el cual indica que la longitud horizontal entre los puntos extremos que se desean proyectar no debe ser mayor de 50 km. Por otra parte es de resaltar que para este método se desprecia la diferencia de elevación, ya que se asume que las elevaciones utilizadas en los puntos a proyectar son ortométricas y no elipsoidales, debido a que esta última altura está ligada a las coordenadas geodésicas y por consiguiente la posición de estos puntos poseen es una distancia elipsoidal y no obtenida o medida en terreno. De igual manera, la discrepancia correspondiente al factor de ampliación o reducción es despreciable y se puede optar por tomar la elevación correspondiente a la tangente al elipsoide si se desea.

De acuerdo a lo establecido anteriormente por éste método, la poligonal se encuentra dentro del parámetro de longitud horizontal, ya que cuenta con una distancia entre los vértices extremos de ± 13 km.

2.4. Aplicación Método Instituto Geográfico Agustín Codazzi IGAC.

El Instituto Geográfico Agustín Codazzi IGAC, mediante el documento titulado “Tipos de Coordenadas Manejadas en Colombia” el cual fue elaborado por la División de Geodesia de la Subdirección de Geografía y Cartografía en el año 2004, estable un procedimiento de cálculo para la conversión de coordenadas Elipsoidales a Planas Cartesianas.

De acuerdo al contenido de este documento, tiene dos limitantes importantes en la utilización de este método, las cuales definen que para un origen plano cartesiano debe tener una diferencia en altura de ± 250 m y una restricción en cobertura en una distancia horizontal que no exceda los 20 Km.

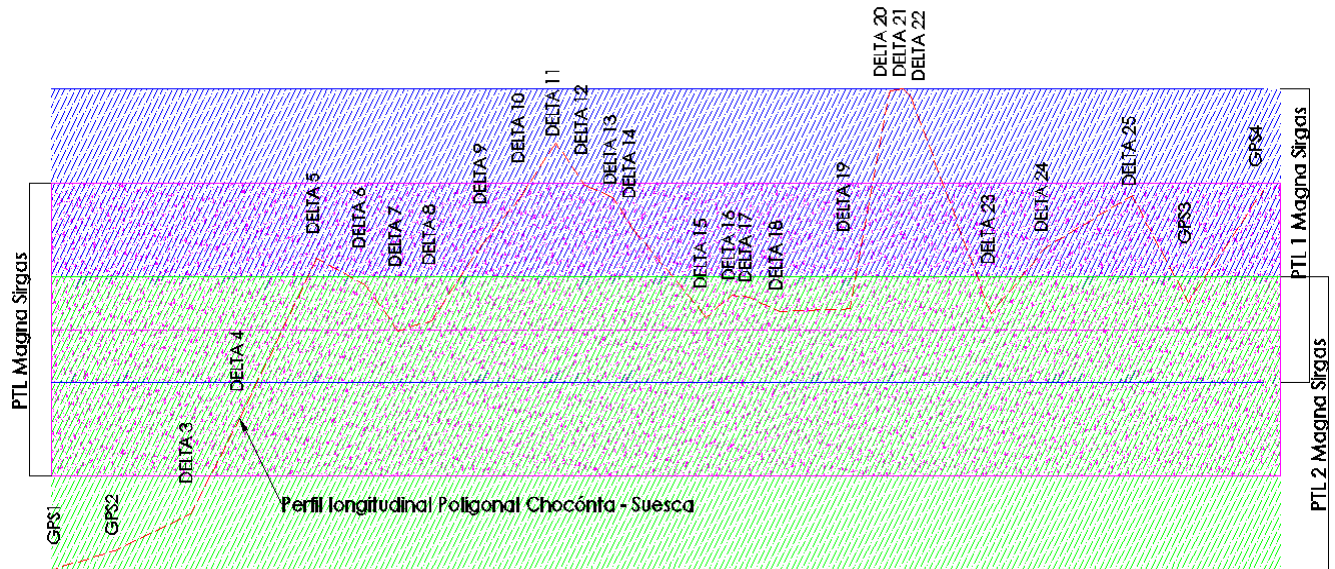
Conforme a lo establecido anteriormente por este método, la poligonal se encuentra dentro del parámetro de longitud horizontal, ya que cuenta con una distancia entre los vértices extremos de ± 13 Km. Respecto a la elevación no cumple con el rango establecido de altura ya que la diferencia de la altura es de 410.412 m.

Por el anterior, se crearon tres Planos Topográficos Locales con el mismo punto de origen en coordenadas Norte y Este pero cada uno con elevación en el origen donde se satisface la limitante de elevación, es decir:

- PTL Magna Sirgas con elevación media de terreno de 2860.155 m.s.n.m.m
- PTL 1 Magna Sirgas con una elevación de 2940.361 m.s.n.m.m
- PTL 2 Magna Sirgas con una elevación de 2779.949 m.s.n.m.m

La siguiente ilustración observa la distribución de los Planos Topográficos Locales Magna Sirgas con respecto a perfil obtenido de la poligonal.

Ilustración 9 Distribución de los Planos Topográficos Locales Magna Sirgas respecto a perfil Poligonal.



Fuente: Propia

3. Resultados

En el siguiente cuadro se observa las coordenadas de los vértice de la poligonal en Plano Topográfico Local por el método de Modelaje 3D.

Tabla 3 Coordenadas Vértices Poligonal en Plano Topográfico Local Método Modelaje 3D.

Punto / Vértice	Norte	Este	Elevación
GPS-1	1061256.353	1044116.807	2654.949
GPS-2	1060820.719	1043075.031	2671.826
DELTA-3	1061147.571	1041807.241	2702.622
DELTA-4	1061879.255	1041350.628	2784.510
DELTA-5	1063043.838	1040683.364	2920.932
DELTA-6	1063248.448	1039858.644	2898.180
DELTA-7	1063623.523	1039416.279	2859.140
DELTA-8	1063418.689	1038869.043	2867.958
DELTA-9	1064071.419	1038292.947	2932.169
DELTA-10	1064485.140	1037726.075	2974.428
DELTA-11	1064633.674	1037147.398	3019.504
DELTA-12	1064966.489	1036763.081	2983.425
DELTA-13	1065079.149	1036279.084	2972.848
DELTA-14	1065405.035	1036199.404	2946.394
DELTA-15	1066662.593	1035893.263	2870.714
DELTA-16	1066903.402	1035513.426	2889.575

Punto / Vértice	Norte	Este	Elevación
DELTA-17	1067063.044	1035273.864	2887.841
DELTA-18	1066961.897	1034753.964	2875.719
DELTA-19	1066796.350	1033522.485	2877.934
DELTA-20	1066894.380	1032829.949	3064.139
DELTA-21	1066709.256	1032704.273	3065.361
DELTA-22	1066564.392	1032685.987	3058.560
DELTA-23	1065489.095	1031798.869	2873.520
DELTA-24	1064593.248	1031530.025	2929.414
DELTA-25	1063191.335	1030902.315	2974.315
GPS-3	1062309.578	1031326.275	2883.776
GPS-4	1060987.805	1031360.352	2979.254
Centroide	1063942.702	1037510.662	2860.155

Acorde a la ilustración 9, en la siguiente tabla se observa un resumen concreto de la cantidad de vértices que componen los tres Planos Topográficos Locales, concluyendo que el PTL Magna Sirgas y PTL 1 Magna Sirgas abarca la mayoría de puntos proyectados.

Tabla 4 Resumen cuantitativo Planos Topográficos Locales Método IGAC.

Puntos / Vértice	Equivalencia	
27	100%	Poligonal
20	74%	PTL Magna Sirgas
23	85%	PTL 1 Magna Sirgas
14	52%	PTL 2 Magna Sirgas
10	37%	En común

En los siguientes cuadros se observan los resultados de la aplicación de éste método en los tres Planos Topográficos Locales.

Tabla 5 Coordenadas Vértices Poligonal en PTL Magna Sirgas - Método IGAC

Punto / Vértice	Norte	Este	Elevación
GPS-1	1061256.265	1044117.021	2654.949
GPS-2	1060820.624	1043075.196	2671.826
DELTA-3	1061147.500	1041807.348	2702.622
DELTA-4	1061879.230	1041350.674	2784.510
DELTA-5	1063043.847	1040683.334	2920.932
DELTA-6	1063248.452	1039858.630	2898.180
DELTA-7	1063623.523	1039416.279	2859.140
DELTA-8	1063418.690	1038869.042	2867.958

Punto / Vértice	Norte	Este	Elevación
DELTA-9	1064071.418	1038292.938	2932.169
DELTA-10	1064485.130	1037726.071	2974.428
DELTA-11	1064633.657	1037147.407	3019.504
DELTA-12	1064966.469	1036763.095	2983.425
DELTA-13	1065079.129	1036279.106	2972.848
DELTA-14	1065405.015	1036199.422	2946.394
DELTA-15	1066662.587	1035893.266	2870.714
DELTA-16	1066903.387	1035513.435	2889.575
DELTA-17	1067063.029	1035273.874	2887.841
DELTA-18	1066961.888	1034753.971	2875.719
DELTA-19	1066796.341	1033522.496	2877.934
DELTA-20	1066894.284	1032830.098	3064.139
DELTA-21	1066709.166	1032704.428	3065.361
DELTA-22	1066564.309	1032686.136	3058.560
DELTA-23	1065489.091	1031798.880	2873.520
DELTA-24	1064593.241	1031530.089	2929.414
DELTA-25	1063191.349	1030902.432	2974.315
GPS-3	1062309.583	1031326.297	2883.776
GPS-4	1060987.859	1031360.466	2979.254
Centroide	1063942.702	1037510.662	2860.155

Tabla 6 Coordenadas Vértices Poligonal en PTL 1 Magna Sirgas – Método IGAC

Punto / Vértice	Norte	Este	Elevación
GPS-1	1061256.231	1044117.104	2654.949
GPS-2	1060820.585	1043075.266	2671.826
DELTA-3	1061147.465	1041807.402	2702.622
DELTA-4	1061879.203	1041350.722	2784.51
DELTA-5	1063043.835	1040683.374	2920.932
DELTA-6	1063248.443	1039858.660	2898.180
DELTA-7	1063623.519	1039416.303	2859.140
DELTA-8	1063418.683	1038869.059	2867.958
DELTA-9	1064071.420	1038292.948	2932.169
DELTA-10	1064485.137	1037726.074	2974.428
DELTA-11	1064633.666	1037147.403	3019.504
DELTA-12	1064966.482	1036763.086	2983.425
DELTA-13	1065079.143	1036279.091	2972.848
DELTA-14	1065405.033	1036199.406	2946.394
DELTA-15	1066662.622	1035893.246	2870.714
DELTA-16	1066903.424	1035513.410	2889.575
DELTA-17	1067063.069	1035273.846	2887.841
DELTA-18	1066961.926	1034753.936	2875.719
DELTA-19	1066796.378	1033522.446	2877.934

Punto / Vértice	Norte	Este	Elevación
DELTA-20	1066894.321	1032830.039	3064.139
DELTA-21	1066709.201	1032704.367	3065.361
DELTA-22	1066564.342	1032686.076	3058.56
DELTA-23	1065489.110	1031798.809	2873.520
DELTA-24	1064593.249	1031530.014	2929.414
DELTA-25	1063191.339	1030902.349	2974.315
GPS-3	1062309.563	1031326.219	2883.776
GPS-4	1060987.821	1031360.389	2979.254
Centroide	1063942.702	1037510.662	2940.361

Tabla 7 Coordenadas Vértice Poligonal en PTL 2 Magna Sirgas – Método IGAC

Punto / Vértice	Norte	Este	Elevación
GPS-1	1061256.299	1044116.937	2654.949
GPS-2	1060820.664	1043075.126	2671.826
DELTA-3	1061147.536	1041807.294	2702.622
DELTA-4	1061879.256	1041350.626	2784.51
DELTA-5	1063043.858	1040683.294	2920.932
DELTA-6	1063248.461	1039858.601	2898.180
DELTA-7	1063623.527	1039416.255	2859.140
DELTA-8	1063418.697	1038869.025	2867.958

DELTA-9	1064071.416	1038292.928	2932.169
DELTA-10	1064485.123	1037726.068	2974.428
DELTA-11	1064633.648	1037147.412	3019.504
DELTA-12	1064966.456	1036763.105	2983.425
DELTA-13	1065079.114	1036279.121	2972.848
DELTA-14	1065404.996	1036199.439	2946.394
DELTA-15	1066662.553	1035893.286	2870.714
DELTA-16	1066903.350	1035513.460	2889.575
DELTA-17	1067062.990	1035273.902	2887.841
DELTA-18	1066961.850	1034754.005	2875.719
DELTA-19	1066796.305	1033522.546	2877.934
DELTA-20	1066894.246	1032830.157	3064.139
DELTA-21	1066709.131	1032704.488	3065.361
DELTA-22	1066564.276	1032686.197	3058.56
DELTA-23	1065489.071	1031798.952	2873.520
DELTA-24	1064593.233	1031530.164	2929.414
DELTA-25	1063191.358	1030902.515	2974.315
GPS-3	1062309.604	1031326.374	2883.776
GPS-4	1060987.896	1031360.543	2979.254
Centroide	1063942.702	1037510.662	2779.949

4. Análisis de resultados

Se realizó un análisis comparativo y estadístico de los resultados obtenidos por el método de modelaje 3D y método IGAC, para lo cual, se calculan las distancias horizontales entre los vértices de la poligonal en los diferentes Planos Topográficos Locales y se comparan con las distancias tomadas en terreno por la estación total, las cuales se consideraron longitudes exactas. Éstos resultados se observan en el siguiente cuadro:

Tabla 8 Distancias Planos Topográficos Locales

Punto / Vértice		Distancia (m)				
Inicio	Fin	Estación Total	PTL Transgeolocal	PTL Magna Sirgas	PTL 1 Magna Sirgas	PTL 2 Magna Sirgas
GPS-2	DELTA-3	1309.311	1309.245	1309.308	1309.324	1309.291
DELTA-3	DELTA-4	862.497	862.471	862.543	862.553	862.531
DELTA-4	DELTA-5	1342.350	1342.198	1342.265	1342.282	1342.248
DELTA-5	DELTA-6	849.695	849.723	849.706	849.716	849.695
DELTA-6	DELTA-7	579.910	579.972	579.959	579.967	579.952
DELTA-7	DELTA-8	584.295	584.315	584.316	584.323	584.308
DELTA-8	DELTA-9	870.608	870.599	870.603	870.614	870.592
DELTA-9	DELTA-10	701.768	701.790	701.780	701.789	701.772
DELTA-10	DELTA-11	597.470	597.436	597.421	597.429	597.413

Punto / Vértice		Distancia (m)				
Inicio	Fin	Estación Total	PTL Transgeolocal	PTL Magna Sirgas	PTL 1 Magna Sirgas	PTL 2 Magna Sirgas
DELTA-11	DELTA-12	508.401	508.395	508.389	508.396	508.383
DELTA-12	DELTA-13	496.947	496.936	496.928	496.934	496.923
DELTA-13	DELTA-14	335.470	335.486	335.487	335.491	335.482
DELTA-14	DELTA-15	1294.338	1294.285	1294.302	1294.320	1294.287
DELTA-15	DELTA-16	449.696	449.739	449.729	449.734	449.723
DELTA-16	DELTA-17	287.759	287.881	287.880	287.884	287.877
DELTA-17	DELTA-18	530.015	529.648	529.650	529.657	529.643
DELTA-18	DELTA-19	1242.399	1242.556	1242.552	1242.567	1242.536
DELTA-19	DELTA-20	699.093	699.440	699.291	699.300	699.282
DELTA-20	DELTA-21	223.747	223.753	223.745	223.747	223.742
DELTA-21	DELTA-22	145.913	146.014	146.007	146.009	146.005
DELTA-22	DELTA-23	1394.030	1394.002	1394.029	1394.047	1394.012
DELTA-23	DELTA-24	935.3110	935.318	935.305	935.317	935.293
DELTA-24	DELTA-25	1536.040	1536.027	1535.986	1536.006	1535.968
DELTA-25	GPS-3	978.259	978.385	978.352	978.363	978.339

De acuerdo a los cálculos realizados anteriormente y su correspondiente análisis, se debe resaltar que la precisión obtenida en la poligonal aumenta en los Planos Topográficos Locales, esto se expresada en la siguiente tabla.

Tabla 9 Precisión Poligonal en los Planos Topográficos Locales.

Poligonal	Precisión
Estación Total	5698
PTL Transgeolocal	7063
PTL Magna Sirgas	6550
PTL Magna Sirgas 1	6608
PTL Magna Sirgas 2	6480

Conforme al anterior cuadro se evidencia que la precisión obtenida aumenta al utilizar los PTL's, siendo el Plano Topográfico Local método de modelaje 3D con la más alta precisión.

Basados en lo anterior, se calcula el error absoluto, error medio cuadrático y precisión en las distancias horizontales de los vértices que componen la poligonal comparándola con su par correspondiente a cada PTL, obteniendo el siguiente cuadro:

Tabla 10 Error Absoluto, Error Medio Cuadrático y Precisión.

Punto / Vértice		PTL Transgeolocal			PTL Magna Sirgas			PTL 1 Magna Sirgas			PTL 2 Magna Sirgas		
Inicio	Fin	Error	Absoluto	Precisión	Error	Absoluto	Precisión	Error	Absoluto	Precisión	Error	Absoluto	Precisión
GPS-2	DELTA-3	0.066	19871		0.004	350547		-0.013	102635		0.020	64731	
DELTA-3	DELTA-4	0.026	33287		-0.045	18994		-0.055	15576		-0.034	25556	
DELTA-4	DELTA-5	0.152	8828		0.085	15834		0.068	19804		0.102	13190	
DELTA-5	DELTA-6	-0.028	30752		-0.011	77975		-0.021	39845		0.000	3256388	
DELTA-6	DELTA-7	-0.063	9231		-0.050	11702		-0.057	10109		-0.043	13643	
DELTA-7	DELTA-8	-0.021	28327		-0.021	27545		-0.029	20274		-0.014	42947	
DELTA-8	DELTA-9	0.009	95700		0.005	164175		-0.006	143266		0.017	52186	
DELTA-9	DELTA-10	-0.021	32896		-0.012	58538		-0.021	34083		-0.003	207236	
DELTA-10	DELTA-11	0.035	17248		0.049	12200		0.042	14330		0.057	10442	
DELTA-11	DELTA-12	0.006	87235		0.012	43935		0.005	98274		0.018	28292	
DELTA-12	DELTA-13	0.011	45960		0.019	26711		0.013	39648		0.024	20769	
DELTA-13	DELTA-14	-0.015	21781		-0.016	20515		-0.020	16384		-0.012	27975	
DELTA-14	DELTA-15	0.053	24596		0.035	36488		0.018	71871		0.051	25501	
DELTA-15	DELTA-16	-0.043	10429		-0.033	13532		-0.039	11672		-0.027	16410	
DELTA-16	DELTA-17	-0.122	2350		-0.122	2366		-0.126	2287		-0.118	2438	
* DELTA-17	DELTA-18	0.367	1445		0.365	1452		0.358	1481		0.371	1428	
DELTA-18	DELTA-19	-0.157	7889		-0.154	8093		-0.169	7372		-0.137	9042	
* DELTA-19	DELTA-20	-0.347	2017		-0.198	3535		-0.207	3383		-0.189	3708	

Punto / Vértice		PTL Transgeolocal			PTL Magna Sirgas			PTL 1 Magna Sirgas			PTL 2 Magna Sirgas		
Inicio	Fin	Error	Absoluto	Precisión	Error	Absoluto	Precisión	Error	Absoluto	Precisión	Error	Absoluto	Precisión
DELTA-20	DELTA-21	-0.006	38603		0.003	88158		0.000	932102		0.006	40085	
DELTA-21	DELTA-22	-0.101	1446		-0.095	1540		-0.097	1511		-0.093	1575	
DELTA-22	DELTA-23	0.028	49218		0.001	972977		-0.016	85175		0.018	75513	
DELTA-23	DELTA-24	-0.007	133218		0.005	175205		-0.006	147360		0.018	52859	
DELTA-24	DELTA-25	0.013	117773		0.054	28515		0.034	44954		0.073	21142	
DELTA-25	GPS-3	-0.126	7738		-0.093	10478		-0.105	9357		-0.080	12236	
PROMEDIO		-0.012	34493		-0.009	90459		-0.019	78031		0.001	167721	
RMS			0.123			0.102			0.103			0.103	

Nota: * Valores atípicos en los resultados obtenidos.

Las discrepancias no son constantes en los diferentes Planos topográficos Locales, donde el 83.3% de las medidas obtenidas en el PTL método de modelaje 3D son inferiores a 0.015 m y para los PTL's método IGAC son del 87.5%.

Del anterior cálculo realizado, se omiten dos vértices o puntos ya que se determinó que estos valores son atípicos a los demás, es decir, que estos datos pueden contener un error inherente a las operaciones topográficas y no al procedimiento que se realizó en la generación de los diferentes PTL's y alteran el resultado obtenido por los métodos aplicados.

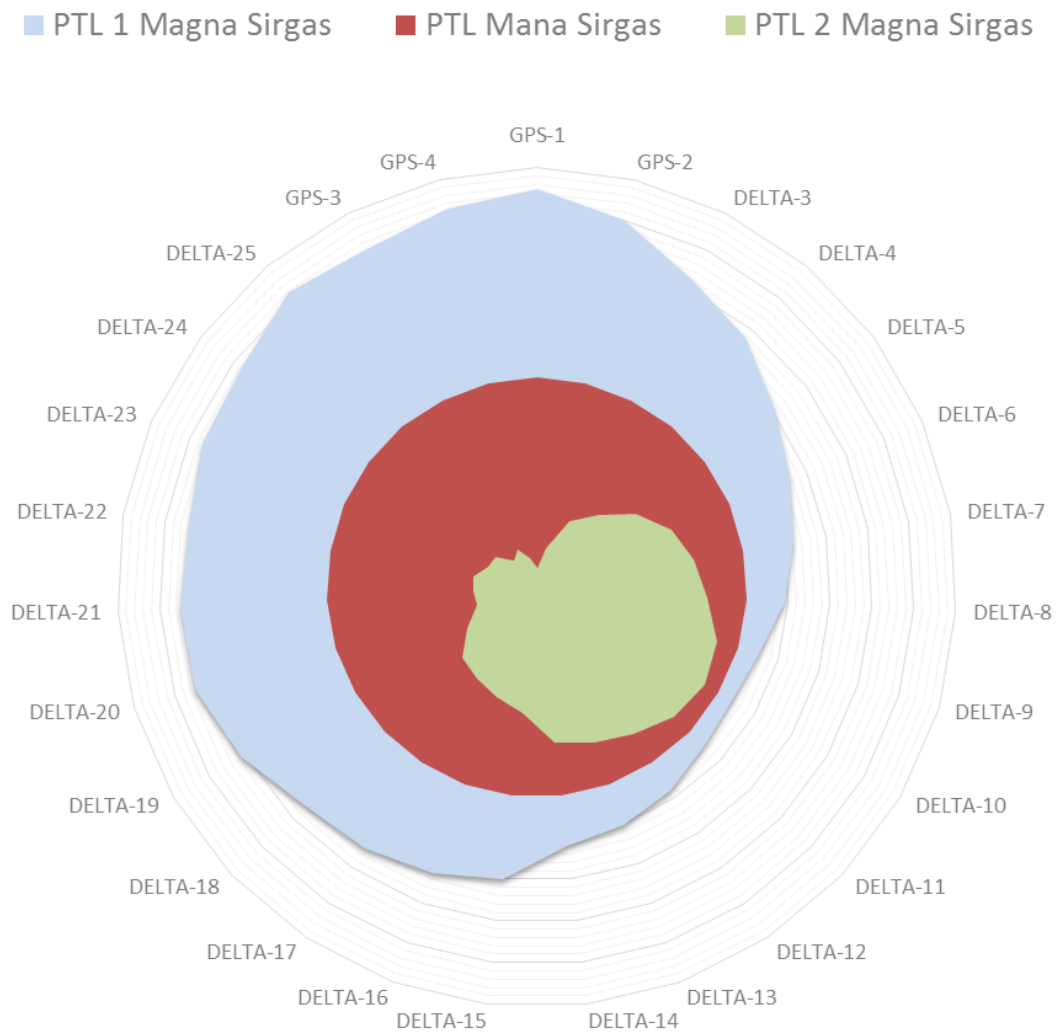
Al eliminar los valores atípicos, se observa que el valor promedio de la precisión en los vértices que componen la poligonal es mayor, como se puede apreciar en el siguiente cuadro:

Tabla 11 Promedio de Error absoluto, Error medio cuadrático y Precisión en las distancias horizontales en los vértices de la poligonal Chocontá Suesca..

Plano Topográfico Local	Error Absoluto	Precisión	RMS
PTL Transgeolocal	0.014	37472	0.698
PTL Magna Sirgas	0.017	98456	0.059
PTL 1 Magna Sirgas	0.027	84904	0.061
PTL 2 Magna Sirgas	0.008	36370	0.060

Los resultados obtenidos con mejores condiciones muestrales permiten concluir que el PTL con el que se obtiene mejor proyección de los puntos es el PTL Magna Sirgas método IGAC, en comparación a PTL 1 Magna Sirgas método IGAC y PTL 2 Magna Sirgas método IGAC. Como se puede apreciar en la siguiente grafica radial del comportamiento de las distancia desde el origen (centroide) a los vértices, presentando una uniformidad en los valores en el PTL Magna Sirgas método IGAC.

Ilustración 10 Comportamiento de la distancia horizontal desde el origen a los vértice en los planos topográficos locales Magna Sirgas Método IGAC.



5. Conclusiones

Los sistemas de proyección cartográfica son indispensables para la Ingeniería en general, tanto así, que aún existen desconocimientos y vacíos conceptuales que se convierten en un problema cuando de ellos se necesita, ya que las propiedades de éstos varían y no son adaptables en todos los casos. Cabe resaltar que la exactitud de los datos en éste tipo de procesos es dependiente única y exclusivamente de los errores inherentes a los procesos de captura de información en terreno, bien sea errores humanos o sistemáticos.

Se comprobó que la aplicación de los métodos utilizados a la poligonal cumple con los requisitos mínimos establecidos, de tal manera que al aplicarse el Modelaje 3D (Transgeolocal) no hay necesidad de establecer un límite en altura entre los puntos máximos y mínimos de elevación siempre y cuando cumpla las dimensiones horizontales máximas de 50 km del PTL para que conserve la exactitud del levantamiento.

Al observar y analizar el comportamiento que presentan los tres Planos Topográficos Locales Magna Sirgas método IGAC, se concluye que la discrepancia que se genera es causada por el factor de reducción y ampliación relacionado directamente con la elevación del punto de origen, este valor se encuentra en un promedio de 5mm para este proyecto de investigación.

La precisión de la poligonal obtenida una vez generados los diferentes PTL's aumenta en un 15% para los PTL's Magna Sirgas y un 24% para el PTL Transgeolocal en comparación con lo obtenido a través de los datos adquiridos por la estación total.

Tabla De Ecuaciones

	Pág.
Ecuación 1 Altura Ortométrica	12
Ecuación 2 Planos Topográficos Locales Utilizando en Modelaje 3D	24
Ecuación 3 Matriz Rotación y Traslación.....	26

Contenido De Tablas

	Pág.
Tabla 1 Coordenadas WGS 84 - Vértices Poligonal	30
Tabla 2 Coordenadas Origen Plano Topográfico Local.....	32
Tabla 3 Coordenadas Vértices Poligonal en Plano Topográfico Local Método Modelaje 3D. ...	36
Tabla 4 Resumen cuantitativo Planos Topográficos Locales Método IGAC.....	38
Tabla 5 Coordenadas Vértices Poligonal en PTL Magna Sirgas - Método IGAC	38
Tabla 6 Coordenadas Vértices Poligonal en PTL 1 Magna Sirgas – Método IGAC.....	40
Tabla 7 Coordenadas Vértice Poligonal en PTL 2 Magna Sirgas – Método IGAC	41
Tabla 8 Distancias Planos Topográficos Locales	43
Tabla 9 Precisión Poligonal en los Planos Topográficos Locales.	45
Tabla 10 Error Absoluto, Error Medio Cuadrático y Precisión.....	46
Tabla 11 Promedio de Error absoluto, Error medio cuadrático y Precisión en las distancias horizontales en los vértices de la poligonal Chocontá Suesca..	48

Tabla De Figuras

	Pág.
Ilustración 1 Ondulación Geoidal (N), Altura Ortométrica (H) y Altura Elipsoidal (h). (INEGI, 2012)	12
Ilustración 2 Elipsoide de Revolución (Gstatic.com, s.f.).....	16
Ilustración 3 Representación de las coordenadas curvilíneas elipsoidales (φ, λ) y altura elipsoidal (h) del punto P.	19
Ilustración 4 Representación del sistema de coordenadas curvilíneas esféricas del punto P.....	20
Ilustración 5 Representación del sistema de coordenadas astronómicas (Φ, Λ) y del sistema de coordenadas astronómicas locales (v, u, w) del punto P.....	22
<i>Ilustración 6 Sistema de Coordenadas Geodésicas (φ, λ) y el Sistema Geodésico Local (v, u, w) asociados a un punto en la superficie terrestre.</i>	<i>23</i>
Ilustración 7 Representación de las reducciones de distancia cuando se emplea el PTL. Dónde: ΔS es el factor de reducción o ampliación; CM es la cota media; SH es la distancia horizontal proyectada sobre el plano medio; R es radio medio de curvatura y ΔH altura del PTL	27
Ilustración 8 Ubicación de los vértices que forman la poligonal.....	29
<i>Ilustración 9 Distribución de los Planos Topográficos Locales Magna Sirgas respecto a perfil Poligonal.</i>	<i>35</i>
Ilustración 10 Comportamiento de la distancia horizontal desde el origen a los vértice en los planos topográficos locales Magna Sirgas Método IGAC.	49

Referencia

Dal’Forno, G. L.; Aguirre, A. J.; Hillebrand, F. L.; Gregorio, F. de V. Transformação de Coordenadas Geodésicas em Coordenadas no Plano Topográfico Local pelos Métodos da Norma NBR 14166:1998 e o de Rotações e Translações. In: Anais III Simpósio Brasileiro de Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação, Recife-PE, 27-30 de julho de 2010.

Jakeli, C. Geometric Reference Systems. Division of Geodesy and Geospatial Science. School of Earth sciences. Ohio State University, 2006. 195 p.

Monico, J. F. G. Posicionamento pelo GNSS – Descrição, Fundamentos e Aplicações. Fundação Editora UNESP, São Paulo. 2a edição, 2008. 480 p.

Burkholder, E. F. Definition and Description of a Global Spatial Data Model manuscript copyrighted by Global COGO, Inc., Las Cruces, NM.