

Poligonación topográfica de alta precisión en el campus de la Universidad del Quindío¹

Topographic traversing of high accuracy inside the campus of Universidad del Quindío

Poligonacao topográfica de alta precisão no campus da Universidad del Quindío

J. Garzón, G. Jiménez y X. Cifuentes

Recibido Agosto 26 de 2015 – Aceptado Febrero 19 de 2016

Resumen— Este trabajo describe el procedimiento de diseño, monumentación y medición de un sistema de poligonación al interior del campus de la Universidad del Quindío, con instrumental clásico, que servirá como marco de referencia para el soporte de los trabajos topográficos y cartográficos de la institución, bajo requisitos técnicos que soporten sus precisiones relativa y absoluta, a través de coordenadas determinadas sobre el sistema de referencia horizontal para Colombia: Datum MAGNA-SIRGAS. La metodología se estructuró bajo la Teoría de Errores, definiendo el límite de las incertidumbres esperadas en función de las características técnicas de los instrumentos de medida, la configuración geométrica del polígono, los métodos y diseños de medición. Se lograron hallazgos interesantes en términos de la propagación del error y sus elipses, debido a que sus magnitudes, formas y orientaciones definieron la dirección de fortalecimiento geométrico del marco de referencia.

Palabras clave— diseño, mediciones topográficas, incertidumbre, instrumentación, poligonación, propagación de errores.

Abstract— This article describes the design procedure, monumentation and measuring system traversing inside the campus of Universidad del Quindío, with classical instruments, which is used as a framework to support the surveying and mapping work of the institution, under technical requirements to support their relative and absolute precision through coordinates determined on the horizontal reference system for Colombia: Datum MAGNA-SIRGAS. The methodology was structured under the theory of errors, defining the limit of the uncertainties expected in terms of the technical characteristics of measuring instruments, the geometry of the polygon, and designs of measurement methods. Interesting findings were obtained in terms of error propagation and ellipses, because of their magnitudes, shapes and orientations defined the direction of strengthening the geometric framework.

Key words— design, topographic surveying, uncertainty, instrumentation, traversing, error propagation.

Resumo— Este trabalho descreve o procedimento de projeção, monumentação e medição de um sistema de poligonação ao interior do campus de a Universidade de Quindío, com instrumental clássico, que servira como um quadro de referência para o suporte dos trabalhos topográficos e cartográficos da instituição, sob-requisitos técnicos que suportem suas precisões relativa e absoluta, através de coordenadas determinadas sobre o sistema de referencia horizontal para Colômbia: Datum MAGNA-SIRGAS. A metodologia se estruturou sob a Teoria de Erros, definindo o limite das incertezas esperadas em função das características técnicas dos instrumentos de medida, a configuração geométrica do polígono, os métodos e projetos de medição. Alcançaram resultados interessantes em termos da propagação do erro e suas elipses, devido a suas magnitudes, formas e orientações definiram a direção de fortalecimento geométrico do quadro de referência.

Palavras chave: projeto, medições topográficas, incerteza, instrumentação, poligonação, propagação de erros.

¹Producto derivado del proyecto de investigación “Diseño red topográfica de alta precisión en el Campus de la universidad del Quindío”. Trabajo adscrito al Grupo de Investigación GEIOIDE G-62, de la Facultad de Ingeniería – Programa de Topografía de la Universidad del Quindío Armenia - Colombia.

J. Garzón. Profesor investigador grupo GEOIDE G-62 (Universidad del Quindío) y Gerencia de la Tierra (Universidad La Gran Colombia). Armenia (Colombia) Campus La Santa María km 7 vía Armenia - La Tebaida (Colombia); email: juliangarzonb@uniquindio.edu.co

G. Jiménez. Profesor investigador, Universidad del Quindío, Facultad de Ingeniería, Programa de Topografía, grupo GEOIDE G-62 (Universidad del Quindío). Armenia - Colombia. Carrera 15 Calle 12 N; email: gjcleves@uniquindio.edu.co

X. Cifuentes. Universidad La Gran Colombia, Decana Facultad de Ingenierías, Profesor investigador grupo Gerencia de la Tierra. Armenia (Colombia) Campus La Santa María km 7 vía Armenia - La Tebaida (Colombia); email: deingenieria@miugca.edu.co

NOMENCLATURA

- s_n : Desviación estándar norte
 s_e : Desviación estándar este
 φ : Latitud
 λ : Longitud
 $s.my$: Semieje mayor
 $s.mr$: Semieje menor

I. INTRODUCCIÓN

EL desarrollo de la Teoría de Errores se atribuye a Gauss quien publicó los tratados ‘*Theoria motus corporum Coelestium*’ en 1809 y ‘*Theoria combinationis observationum erroribus obnoxiae*’ en 1823, donde se define su aplicación práctica llegando a la deducción que los gobierna y que hoy lleva su nombre [1]. Los procedimientos topográficos implican el uso de principios físicos y matemáticos, la selección apropiada de éstos depende en gran parte del conocimiento de los fundamentos de la medición topográfica, así como del análisis de sus resultados [2]. Se sabe que toda magnitud observada o medida contiene errores de cuantía desconocida debido a múltiples causas, por lo cual una medida nunca es realmente verdadera [3], [4]. La determinación numérica de la medida de una magnitud física siempre se encuentra sujeta a error, que se pone de manifiesto al obtener diferentes resultados de la misma medida. [5] señala que las mediciones repetidas de una magnitud dada por un mismo observador, con un mismo instrumento y en circunstancias análogas no conducen siempre a un mismo resultado, estas observaciones están afectadas por errores atribuidos a los agentes que concurren a la medición: el observador, el instrumento y las condiciones ambientales. De acuerdo con lo indicado por [6] [7] [8], los errores en la medición se pueden agrupar en tres categorías: equivocaciones, errores sistemáticos y errores aleatorios; los primeros resultan de descuidos en las observaciones, los segundos se originan de fuentes que actúan de forma similar en las observaciones, se rigen por las leyes de la física por lo que su magnitud puede calcularse y su efecto eliminarse, y los últimos permanecen en la medida y se desconoce su valor, obedecen a las leyes de la probabilidad y se tratan mediante procesos estadísticos [9] [10] [11]. De acuerdo a las fuentes, los errores se categorizan como: instrumentales, personales y naturales [12] [13] [14] [15]. Los errores instrumentales son causados por las imperfecciones en la construcción y ajuste de los instrumentos, así como por el excesivo movimiento de sus piezas individuales [16], [17]. Los errores personales provienen de la limitación de los sentidos humanos, y los naturales tienen su origen en las variaciones de las condiciones ambientales de la medida [18]. Existen dos métodos para reducir y eliminar errores: el primero es mejorar la precisión del instrumental de medición y el segundo, adoptar una apropiada rutina de medición [19].

La evolución de la topografía en las últimas décadas no

solo ha incidido en los instrumentos de medición, sino en la incorporación de nuevos términos que han permitido que la ciencia de la metrología defina con claridad conceptos como el de incertidumbre. Según [20] “*la incertidumbre es un parámetro asociado al resultado de una medición, que caracteriza la dispersión de los valores que podrían ser razonablemente atribuidos al mensurando*”. En topografía se considera que el elemento fundamental de los trabajos de campo es el punto, y es a partir de su definición que se da la existencia de los sistemas de apoyo geométricos por medio de las poligonales que se definen como una serie consecutiva de puntos ligados entre sí a partir de observación de ángulos y distancias [21] [22] [23]. Las técnicas de poligonación incluyen: el reconocimiento de campo, selección del instrumental de medición, observaciones de campo, cálculo y ajuste [24]. Al igual que con cualquier técnica topográfica la incertidumbre de una poligonal se propaga directa y acumulativamente en el punto final de la medición, esta incertidumbre es atribuible al diseño de la red, el número de armadas del instrumento, los procedimientos de medición empleados y la longitud de la poligonal, se hace entonces necesario, examinar la incertidumbre de las restricciones mínimas del ajuste (elipse de error), y la incertidumbre relativa (desviaciones estándar, errores de cierre lineales) de forma que permitan evaluar la calidad de las mediciones [25]. Se ha demostrado que los criterios de fiabilidad y resistencia geométrica de las poligonales son altamente correlacionados [26]. La poligonación han sido ampliamente usada en diversos proyectos de ingeniería topográfica como elemento fundamental en la mediciones para control de obras civiles y ubicación de objetos sobre mapas [27] [28] soporte geométrico para medición planimétrica de terrenos [29] control de deformaciones estructurales [30] proyectos de desarrollo vial [31] túneles [32] delimitación predial [33] densificación de redes geodésicas [34], así como trabajos mineros y geológicos [35] [36] [37].

La oficina de *Planeación y Desarrollo* de la universidad tiene entre sus funciones *planificar el crecimiento y adecuación del campus*, lo que la convierte en el principal usuario de la información topográfica a nivel institucional; esta dependencia es la unidad responsable del soporte físico-matemático de la información topográfica y cartográfica de la institución y su permanente actualización; para lograr este cometido es necesario definir un sistema de referencia espacial unificado e interoperable que permita confeccionar el mapa topográfico actualizado del campus bajo estándares señalados por el Programa Académico de Topografía. El objetivo fundamental de este trabajo ha sido el diseño, monumentación y medición de un sistema de poligonación que sirva como marco de referencia lo suficientemente preciso para el soporte de los trabajos topográficos y cartográficos (en entornos SIG) al interior del campus, bajo requisitos técnicos que soporten sus precisiones relativa y absoluta, a través de coordenadas determinadas sobre el sistema de referencia horizontal para Colombia: Datum MAGNA-SIRGAS.

La metodología se apoyó en la Teoría de Errores, que permitió definir el límite de las incertidumbres esperadas en función de las características técnicas de los instrumentos de medida, la configuración geométrica del polígono, los métodos y diseños de medición. La implementación de esta metodología permitió hacer hallazgos interesantes en términos de la propagación del error y sus elipses, ya que sus magnitudes, formas y orientaciones dependieron de las restricciones usadas en el ajuste, la precisión de las observaciones, y la geometría del polígono.

II. DESARROLLO DEL ARTÍCULO

A. La Universidad y el Campus

La Universidad del Quindío es un establecimiento educativo público de carácter académico superior, cuenta con un área superficial de 25 Ha, de las cuales 13 corresponden a zonas de protección natural que se encuentran delimitadas por cerca de 2 Km de quebradas, lo cual denota su riqueza hídrica y topografía escarpada. El Campus Universitario se encuentra ubicado en latitud $4^{\circ}33'10''$ N y longitud $75^{\circ}39'33''$ W del Meridiano Origen, y tiene una elevación de 1530 metros sobre el nivel medio del mar (Fig. 1). A nivel nacional es categorizada como una universidad de tamaño mediano, y fue fundada con el Programa Académico de Topografía hace 53 años.



Fig. 1. Localización de la zona de estudio. Fuente: SIG Quindío

El proyecto contó con una base cartográfica elaborada en el año 2000 por métodos topográficos clásicos bajo una estructura vectorial en formato dwg; así mismo se tuvieron a disposición diferentes instrumentos de medición angular y lineal, de los cuales se seleccionaron aquellos de menor desviación estándar pertenecientes al *Laboratorio de Instrumentos Topográficos* de la universidad, definiendo para las observaciones angulares un teodolito reiterador Carl Zeiss Jena THEO-010A con lectura directa de $\pm 1''$ y para la medición electrónica de distancias la estación total South NTS-372R, que de acuerdo a su ficha técnica mide con precisión de $\pm 2 \text{ mm} \pm 2 \text{ ppm}$.

El objeto de la metodología es la implementación de un modelo experimental de medición (Fig. 2) que permita definir los valores de su incertidumbre, combinando las

características técnicas de los instrumentos de medida con la fuerza geométrica del polígono de apoyo, a través de la monumentación de 13 puntos que definen el marco de referencia, con una cobertura aproximada de 10 Ha.

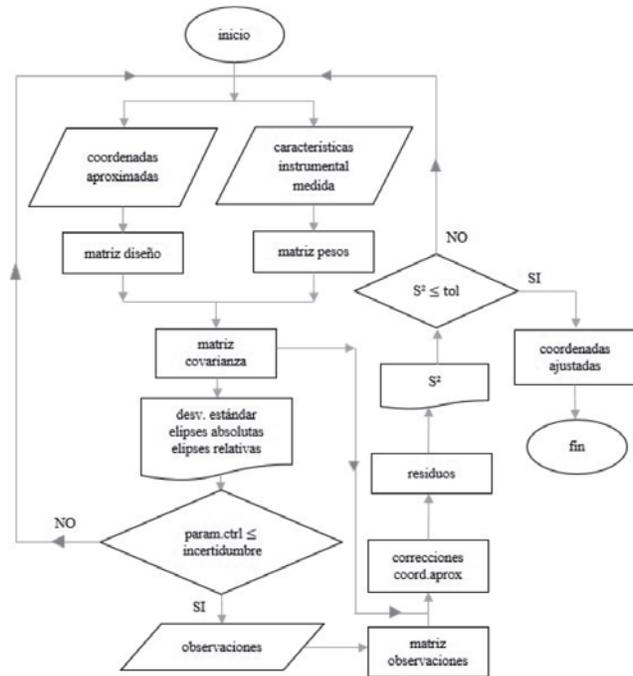


Fig. 2. Diagrama de flujo matemático de pre-diseño, diseño, análisis, y ajuste de observaciones topográficas

1) Prediseño

La precisión del marco de referencia no depende solo de la precisión de las mediciones sino también de su configuración geométrica; para que la poligonal sea fuerte y confiable, los vértices deben hallarse lo más uniforme posibles tanto que las condiciones de campo así lo permitan, y enlazadas mediante observaciones directas, teniendo en cuenta que la mayor longitud no debe superar cinco veces el vector más corto del polígono [38]. La fuerza geométrica de las poligonales es especialmente baja cuando se cambia la dirección de un vector en ángulo de 90° con relación a la dirección principal del avance [39]. Diferentes autores como [40] [41] [42] señalan diversos aspectos importantes en el posicionamiento de los vértices de poligonación y redes topográficas, como: garantía de permanencia en el tiempo, estabilidad dimensional y material, facilidad de estacionamiento, descarte de posicionamiento de vértices en áreas susceptibles a asentamientos causados por movimientos de tierra, y las formas geométricas generales de construcciones existentes en el área de cobertura del polígono (superficial, lineal, o en altura).

Antes de realizar cualquier proceso de medición en campo, es necesario el establecimiento de las estaciones aproximadas que definirán los vértices de la poligonal, el diseño de medición, su incertidumbre asociada, y la propagación de sus errores, todo esto es lo que se define

como pre-diseño. De acuerdo con [43] [44] la propagación de errores implica obtener las características estadísticas de las variables dependientes dadas las características de las independientes y las relaciones de funciones relativas en los dos conjuntos de variables (varianzas y co-varianzas), en el pre-diseño esta propagación debe ser acotada cuando se combinan varias fuentes de error sobre un mismo conjunto de mediciones, estableciendo las relaciones de observación entre errores derivados de ángulo combinados con aquellos producidos por la medición de la distancia. Según [45] la ecuación de propagación de errores se define así:

$$\sigma_z = \sqrt{\left(\frac{\partial Z}{\partial x_1} \sigma_{x_1}\right)^2 + \left(\frac{\partial Z}{\partial x_2} \sigma_{x_2}\right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial Z}{\partial x_n} \sigma_{x_n}\right)^2} \quad (1)$$

donde, $(\partial Z/\partial x_i)\sigma_{x_i}$ representa la contribución individual al error total que ocurre como resultado de errores en las observaciones en cada variable independiente.

Generalmente en el pre-diseño no se logran todas las condiciones ideales debido a las características obligantes del terreno; hay poligonales en donde la adyacencia de vértices no logra ser enlazada de manera conveniente y suelen suceder desequilibrios en las distancias que afectan la rigidez de la figura, lo que se verá fuertemente reflejado en los resultados de propagación de los errores.

De forma general la calidad de un sistema de poligonación estará dado en términos de la incidencia que presenten las variables estadísticas de la medición sobre las coordenadas; como producto de los errores accidentales en la medición se obtienen las elipses absolutas de error que determinan la incertidumbre en el posicionamiento de cada vértice, las elipses relativas que dan cuenta de la precisión que existe entre un par de estaciones, su orientación está definida por el ángulo que se forma entre el semieje mayor y la línea que une la estación con el punto a observar.

No se logra incrementar la calidad de las mediciones aumentando solamente el número de reiteraciones, de acuerdo con [46] la calidad de los datos dependerá esencialmente de la calidad del diseño de la poligonal, la calidad del modelo de ajuste matemático, y la calidad de las observaciones.

Una vez definidas la geometría conformada por las estaciones aproximadas y el instrumental de medición, se obtuvo un estimativo de consistencia con los demás puntos de la red que reflejará la capacidad de levantamiento permitiendo duplicar los valores de control ya existente, de acuerdo con la NTC 5204 para este sistema de poligonación aplicará orden cinco con una clasificación de precisión del 95 % de confianza menor o igual que 0,020 m.

2) Diseño de la poligonal viable y probable

[47] Indican que el diseño de redes se divide en cuatro etapas conocidas como: problemas de diseño cero, uno dos

y tres: PD0 se relaciona con el sistema de referencia espacial de la red, PD1: responde a que vértices hay que realizar las observaciones, PD2: define la metodología e instrumentos de medición, PD3: aprovechamiento de otras redes.

Un *sistema de referencia* es el conjunto de convenciones y conceptos teóricos adecuadamente modelados que permiten definir en cualquier momento la orientación, ubicación y escala de tres ejes coordenados (X, Y, Z), ya que es un modelo conceptual, se accesa mediante puntos materializados en mojones con coordenadas determinadas sobre el sistema de referencia dado, a este conjunto de puntos se le conoce como *marco de referencia* [48]. El sistema de referencia geocéntrico definido por el *Servicio Internacional de Rotación Terrestre y Sistemas de Referencia* (IERS) usado en geodesia es un *Sistema Convencional de Referencia Terrestre* (ITRS), su materialización en el globo terráqueo es el marco ITRF (International Terrestrial Reference Frame). En América Latina la densificación del marco de referencia ITRF es la red SIRGAS (Sistema de Referencia Geocéntrico para América del Sur) con 58 estaciones GPS distribuidas sobre el continente.

El Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC) es el ente gubernamental Colombiano encargado de determinar, establecer, mantener y proporcionar los sistemas de referencia geodésico, gravimétrico y magnético (decretos No 2113/1992 y 208/2004); este instituto ha definido un *Marco Geocéntrico Nacional de Referencia* o Red MAGNA de estaciones GPS de primer orden (precisión de ± 1 mm en coordenadas) conformado por 60 estaciones GPS con cobertura nacional, ocho de las cuales son vértices SIRGAS y 16 corresponden a la red geodinámica CASA (Central And South America GPS Project), su Datum geodésico asociado corresponde con el elipsoide WGS84, y por estar referida a SIRGAS se conoce como MAGNA-SIRGAS. Dichos vértices fueron determinados con el propósito de suministrar una plataforma confiable a los productores y usuarios de información georreferenciada en el país [49].

La red básica GPS del Quindío (RGQ-2000) está distribuida uniformemente sobre el departamento y compuesta por 62 estaciones, determinadas por el IGAC bajo el sistema MAGNA siguiendo especificaciones internacionales para la definición de redes GPS regionales de primer orden; la poligonación de alta precisión objeto de este estudio al interior del Campus Universitario, es una densificación de dicho sistema (MAGNA-SIRGAS), totalmente compatible con el Datum continental SIRGAS y con el ITRF mundial, pues uno de sus vértices también lo es de la red geodésica departamental (D-QN 2), las estaciones restantes del sistema de poligonación en cuestión fueron densificados con instrumentos clásicos (ópticos y electrónicos) de medición.

3) Construcción de bases de observación

Se utilizó una técnica de construcción robusta que

permitió definir el marco de referencia con materiales de buena calidad y en terrenos estables que garanticen su estabilidad temporal. El mojón está fundido en un bloque de concreto con profundidad de 1,10 m, y 40 cm de lado, al interior lleva cuatro varillas de acero de ½” (Fig. 3) que permiten que la estructura alcance su máxima resistencia con flejes separados cada 15 cm, en su parte central se encuentra embebida una varilla de ½” en acero inoxidable y con longitud de 1,20 m que posee un punto grabado que define las coordenadas del hito. El mojón sobresale 35 cm sobre el nivel del terreno natural para su fácil identificación visual.

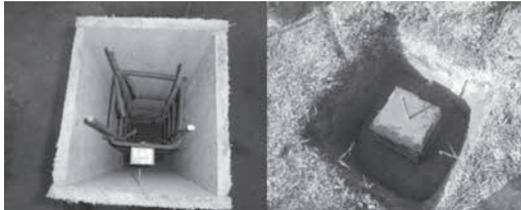


Fig. 3. Materialización de las estaciones locales

4) Instrumentación

[50] Indican que existen cuatro errores principales en los teodolitos óptico-mecánicos que aportan una alta contribución al error accidental y que se refleja en la incertidumbre angular de itinerario de medición; dichos errores son: verticalidad, puntería, lectura, y dirección, actúan de manera independiente y producen el error total angular.

a) Error de verticalidad del eje principal

Al poner el instrumento en estación (Fig. 4), éste no quedará perfectamente vertical, ello da lugar a este error, se calcula con la siguiente expresión:

$$e_v = \frac{1}{12} S'' \tag{2}$$

Donde, S corresponde a la sensibilidad del instrumento, expresada en segundos.

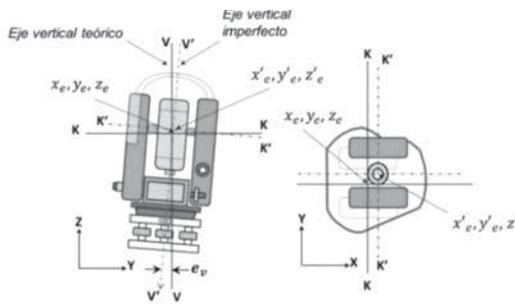


Fig. 4. Error de verticalidad eje VV

b) Error de puntería

Se genera por la no coincidencia entre el objeto que se quiere visar y el centro del retículo del antejo (Fig. 5), se define así:

$$e_p = \frac{10''}{A} \left(1 + \frac{4A}{100} \right) \tag{3}$$

A es el número de veces que se amplifica el tamaño aparente de los objetos.

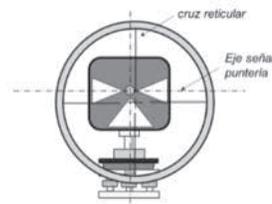


Fig. 5. Error de puntería

c) Error de lectura

Es el cometido al realizar la estimación de una lectura en el círculo graduado del teodolito.

$$e_l = \frac{2}{3} m \tag{4}$$

donde, m es la mínima graduación del círculo en lectura directa.

d) Error de dirección

Es el producido debido a la no coincidencia entre el punto donde se desea centrar el instrumento y aquel punto en que en realidad está situado, afecta tanto a la estación como al objetivo donde se está visando, se calcula de la siguiente forma:

$$e_d = \frac{e_e + e_p}{D} \rho \tag{5}$$

donde, e_e es el error en el centrado del teodolito, e_p corresponde al error de centrado de la señal visada, D es la distancia entre el teodolito y la señal, y ρ es el factor de conversión de radianes a segundos sexagesimales.

Una de las mayores fuentes de incertidumbre en la medición de ángulos horizontales en procedimientos topográficos proviene del centrado del instrumento [51]. Cuando éste se estaciona sobre un mojón se presenta un desplazamiento con respecto al valor verdadero de su centro causando incertidumbre en su posición horizontal, esta incertidumbre depende esencialmente del sistema de centrado, la calidad del trípode y la habilidad del instrumentador [23]. En el centrado con plomada óptica [52] señalan que el valor de esta incertidumbre es de 2 mm, [53]; y [54] indican que es de 1 mm, mientras que [15] indican que se encuentra entre 1 y 0,5 mm. En la ejecución de este trabajo, el centrado de instrumentos (teodolito y señales de puntería) se realizó con plomada óptica cenit-nadir, considerada un instrumento práctico de centrado forzoso sobre la base nivelante, con una desviación típica de 1 mm en 30 m.

Cuando existe solo una estación el error de centrado se

concibe como sistemático (Fig. 6), sin embargo, dado que la ubicación del instrumento sobre el punto es aleatoria y que el proceso de poligonación incluye muchas estaciones, su tratamiento estadístico debe corresponder al de errores accidentales; por ello el error de centrado es sistemático en efecto pero aleatorio en naturaleza.

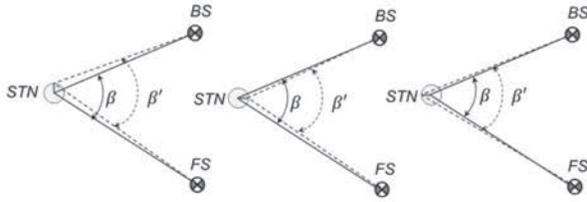


Fig. 6. Efectos del centrado del instrumento en la medición de ángulos horizontales. En el caso (a) el error se compensa, en los casos (b) y (c) presenta su mayor magnitud.

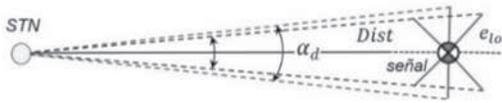


Fig. 7. Magnitud de los errores angulares debido al centrado de la señal.

El máximo error angular ocurrirá cuando el centrado de la señal de puntería sea perpendicular a la dirección de cada punteo del teodolito (Fig. 7), cada error de centrado atrás y adelante en el recorrido de la poligonal afectará el error angular total y se propagará de acuerdo a la ley de la suma de errores aleatorios.

e) Error total angular

Es aquel que contiene la sumatoria de los cuatro errores principales, de acuerdo con [50] [55], cuando se utiliza el método de reieración en la medición de ángulos horizontales, se disminuyen los errores de lectura y puntería debido a la regla de Bessel, pues cada ángulo es medido en una zona diferente del limbo; aplicando la ley de propagación de los errores (error de la suma) el error total angular quedará definido así:

$$\text{donde, } e_{ta} = \sqrt{\frac{2e_i^2}{n} + \frac{2e_p^2}{n} + e_v^2 + e_d^2} \quad e_p \text{ es el error de puntería, } e_v \text{ es el error de verticalidad, } e_d \text{ es el error en dirección, y } n \text{ es el número de veces que se reitara el ángulo.} \quad (6)$$

puntería, e_v es el error de verticalidad, e_d es el error en dirección, y n es el número de veces que se reitara el ángulo.

f) Error transversal

Es el ocasionado por la influencia de acumulación de los errores angulares sobre el recorrido de la poligonal, su modelo matemático es:

$$e_{tr} = \frac{L}{N} \cdot \frac{e_{ta}}{206265} \cdot \sqrt{\frac{N(N+1)(2N+1)}{N+1}} \quad (7)$$

donde, L es el perímetro del polígono, e_{ta} corresponde al error total angular, N es el número de vértices.

g) Error longitudinal

Es generado en la medición electrónica de distancias, en este procedimiento los errores de centrado tanto del instrumento de medición como de la señal juegan un papel definitivo, especialmente en distancias cortas; de acuerdo con [45] se determina así:

$$e_{lo} = \sqrt{\sigma_i^2 + \sigma_t^2 + a^2 + (D \cdot b_{ppm})^2} \quad (8)$$

donde, σ_i es el error de centrado del instrumento, corresponde al error de centrado del reflector, a y b son los parámetros de precisión especificados para el instrumento, y D es la distancia medida.

h) Error lineal del itinerario

Corresponde al error total de distancia en el recorrido de la poligonal, se expresa en términos del error de la serie, y se define así:

$$e_{li} = e_{lo} \sqrt{n} \quad (9)$$

donde, e_{lo} corresponde al error longitudinal y el número de estaciones.

i) Error total

Es la suma de los errores cometidos en las mediciones angulares y de distancia. Según [13] se calcula así:

$$e_t = \sqrt{e_{tr}^2 + e_{li}^2} \quad (10)$$

donde, e_{tr} es el error transversal y e_{li} el error lineal del itinerario.

5) Procedimientos de verificación instrumental

La evaluación del instrumento de medición angular (THEO-010A) se realizó mediante procedimientos de campo que permitieron verificar la magnitud de los errores de colimación horizontal, vertical y de inclinación. La implementación de evaluación instrumental se realizó mediante nueve señales de puntería ubicadas a distancia aproximada de 50 m; se emplazaron tres láminas reflectivas en un plano aproximadamente horizontal en sitios estratégicos que permitieron visuales libres; con las lecturas angulares obtenidas se calculó la magnitud del error de colimación horizontal: $2''{,}67$, con otras tres láminas se realizó el procedimiento de observaciones para determinar la magnitud del error de colimación vertical: $8''$. Posteriormente se ubicaron tres láminas reflectivas en la parte alta de un edificio presente en la misma zona, a las que se les realizaron observaciones de lecturas de círculos horizontales y verticales, con dichos datos se determinó la presencia del error de inclinación y su magnitud: $1''{,}93$.

La evaluación del dispositivo electro-óptico de medición de distancias (estación total South NTS-372R) se realizó en la base de calibración de distanciómetros perteneciente al laboratorio de metrología de la universidad, donde se verificó que éste se encuentra en el rango de error que sugiere la ficha técnica: $\pm 2 \text{ mm} \pm 2 \text{ ppm}$.

6) Plan o programa de observación

El procedimiento de observaciones de campo se realizó en periodos específicos del día (de 8:00 - 10:30 y de 15:00 - 17:30) a fin de reducir los efectos de las distintas fuentes de incertidumbre natural (refracción atmosférica, humedad, presión atmosférica, viento, y cambios de temperatura que pueden ocasionar expansión desigual de las partes del instrumento) que alteran las medidas siendo susceptibles a una mayor propagación del error en trabajos de alta precisión. [56].

Previo al procedimiento de medición de distancias se configuraron al instrumento los valores de presión barométrica de la zona: 640 mmHg y temperatura promedio de 24° C para realizar el ajuste de reducción de distancias, así mismo, se configuró para realizar la medición entre un par de puntos con diez repeticiones. La medición electrónica utilizó metodología de distancias recíprocas; todos los instrumentos de medición tuvieron un centrado estricto con la plomada cenit-nadir, luego de nivelar los instrumentos se tuvo un tiempo de espera de diez minutos antes de realizar cualquier medición, tiempo en el cual se realizó la rotación y giro de las partes móviles del instrumento.

De acuerdo con [9] el método de reiteración para medir ángulos horizontales disminuye los efectos de los errores sistemáticos tales como excentricidad, graduación y colimación del círculo horizontal. Las magnitudes angulares de los errores de graduación y excentricidad obtenidas en cada set fueron promediadas, se calculó su desviación estándar para obtener la media del ángulo, la cual no debía exceder $00^{\circ}00'00''$,8 entre observaciones.

La línea base de la poligonal se definió a partir del posicionamiento de un receptor GNSS de doble frecuencia que permitió la orientación de norte geográfico del polígono (Fig. 8). Este posicionamiento tuvo tiempo de observación de dos horas en los puntos que definen los extremos de la línea base (DQN2 y UQ-01). Las coordenadas elipsoidales calculadas y ajustadas al Datum MAGNA SIRGAS de DQN2 fueron φ : $04^{\circ} 33' 15''$,1628 N y λ : $75^{\circ} 39' 44''$,1845 W, y UQ-01 con φ : $04^{\circ}33'16''$,21077 N y λ : $75^{\circ}39'43''$,57549 W, que definen un azimut para la línea DQN2 UQ-01 de $30^{\circ} 15' 15''$,21 y una separación horizontal de 37,282 m, bajo el sistema cartesiano local de Armenia.



Fig. 8. Establecimiento de receptor GNSS en UQ-01

Luego se realizaron las observaciones de campo que permitieron registrar los ángulos horarios internos del polígono (Tabla I) y las distancias horizontales (Tabla II) entre los vértices.

TABLA I.
ÁNGULOS HORARIOS SIN AJUSTAR

| Estación | Atrás | Adelante | Ángulo horario |
|----------|-------|----------|----------------|
| UQ-01 | UQ-02 | DQN2 | 162°30'21.1" |
| DQN2 | UQ-01 | UQ-12 | 216°31'08.9" |
| UQ-12 | DQN2 | UQ-11 | 68°20'03.9" |
| UQ-11 | UQ-12 | UQ-10 | 71°49'16.0" |
| UQ-10 | UQ-11 | UQ-09 | 144°41'28.2" |
| UQ-09 | UQ-10 | UQ-08 | 149°49'39.8" |
| UQ-08 | UQ-09 | UQ-07 | 230°33'55.4" |
| UQ-07 | UQ-08 | UQ-06 | 146°44'36.1" |
| UQ-06 | UQ-07 | UQ-05 | 185°36'45.6" |
| UQ-05 | UQ-06 | UQ-04 | 100°43'53.3" |
| UQ-04 | UQ-05 | UQ-03 | 119°39'36.7" |
| UQ-03 | UQ-04 | UQ-02 | 128°50'57.3" |
| UQ-02 | UQ-03 | UQ-01 | 154°08'26.5" |

TABLA II.
DISTANCIAS HORIZONTALES SIN AJUSTAR

| Estación | Atrás | Distancia (m) |
|----------|-------|---------------|
| UQ-01 | DQN2 | 37,2815 |
| DQN2 | UQ-12 | 91,5750 |
| UQ-12 | UQ-11 | 62,3885 |
| UQ-11 | UQ-10 | 132,1390 |
| UQ-10 | UQ-09 | 66,3100 |
| UQ-09 | UQ-08 | 133,8570 |
| UQ-08 | UQ-07 | 121,0120 |
| UQ-07 | UQ-06 | 44,5680 |
| UQ-06 | UQ-05 | 95,4805 |
| UQ-05 | UQ-04 | 132,5650 |
| UQ-04 | UQ-03 | 235,0480 |
| UQ-03 | UQ-02 | 116,6410 |
| UQ-02 | UQ-01 | 125,7500 |

7) Ajuste

Las redes topográficas locales buscan definir un marco de referencia geométrico como soporte a trabajos ingenieriles y de representación cartográfica, esta definición se realiza a partir de observaciones de campo lo que plantea

que hay que buscar la correlación matemática entre los parámetros del modelo conceptual y las observaciones que definen el emplazamiento del marco físico; así mismo, es de obligatorio análisis el modelo estadístico de los errores propios producidos por la medición. Según [57] una poligonal es la combinación básica de dos mediciones topográficas: distancias y direcciones, éstas se consideran una forma indirecta de definir las coordenadas de los vértices del polígono.

Asumiendo que las equivocaciones y los errores sistemáticos han sido eliminados, las direcciones y distancias de la poligonal son afectadas por pequeños errores aleatorios (que obedecen a las leyes de la probabilidad y se espera que estos se ajusten a la distribución normal) que se evidencian en el error de cierre de la poligonal, la sumatoria interior de los ángulos de cualquier polígono cerrado obedece al modelo geométrico:

$$e_c = (n - 2) \cdot 180^\circ \quad (11)$$

donde, e_c es el error de cierre y corresponde al número de vértices del polígono.

Un residual tiene la misma magnitud que un error pero con signo contrario y ya que las distancias y direcciones son medición indirecta de coordenadas, se puede decir que los residuales son función de las coordenadas de los puntos de la poligonal. El ajuste de una poligonal por *Mínimos Cuadrados* determina un conjunto de coordenadas que hace que *la suma al cuadrado de los residuales sea la mínima*. La gran ventaja que presenta este modelo de ajuste es que se permite la inclusión simultánea de todas las observaciones, y cada una de ellas se puede ponderar de acuerdo con su precisión estimada [23].

Según [43] la solución mínimo cuadrática de ecuaciones de observaciones topográficas de distinto peso está definida por el modelo matricial:

$$X = (A^T W A)^{-1} A^T W L \quad (12)$$

donde, X es el valor del residual, A es la matriz Jacobiana que contiene los coeficientes de las ecuaciones de observación linealizadas por aproximaciones sucesivas de Taylor, W es la matriz de los pesos, y L es la matriz de las observaciones.

B. Resultados

La poligonal obtuvo un error total angular de $8,8''$, un error lineal de $-0,0078$ m en dirección N-S y $-0,0001$ m dirección E-W y una precesión horizontal de $5,57$ PPM.

El error asociado al posicionamiento planimétrico de los puntos se determinó mediante los parámetros de la elipse de error absoluta que define la incertidumbre producida a través de las características técnicas de los instrumentos de medida

con la fuerza geométrica del sistema de poligonación (Tabla III). Se encontraron desviaciones mínimas de los semiejes de las elipses cotejadas entre los resultados del prediseño y aquellas de las mediciones ajustadas; la máxima desviación fue de 8 mm evidenciando las bondades del prediseño de especificaciones en poligonación topográfica.

TABLA III.
MAGNITUDES SEMIEJES ELIPSES ABOLUTAS PREDISEÑO VS MEDICIÓN

| Estación | Prediseño | | Medición | | Residuales | |
|----------|-----------|-------|----------|-------|------------|-------|
| | s.my | s.mn | s.my | s.mn | s.my | s.mn |
| DQN2 | 0,000 | 0,000 | 0,00 | 0,00 | 0,000 | 0,000 |
| UQ-01 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 |
| UQ-02 | 0,006 | 0,005 | 0,006 | 0,006 | 0,000 | 0,001 |
| UQ-03 | 0,009 | 0,007 | 0,012 | 0,007 | 0,003 | 0,000 |
| UQ-04 | 0,016 | 0,008 | 0,020 | 0,008 | 0,004 | 0,000 |
| UQ-05 | 0,017 | 0,007 | 0,021 | 0,008 | 0,004 | 0,001 |
| UQ-06 | 0,014 | 0,008 | 0,018 | 0,009 | 0,004 | 0,001 |
| UQ-07 | 0,013 | 0,008 | 0,016 | 0,016 | 0,003 | 0,008 |
| UQ-08 | 0,010 | 0,007 | 0,012 | 0,008 | 0,002 | 0,001 |
| UQ-09 | 0,010 | 0,006 | 0,011 | 0,006 | 0,001 | 0,000 |
| UQ-10 | 0,010 | 0,006 | 0,010 | 0,006 | 0,000 | 0,000 |
| UQ-11 | 0,007 | 0,006 | 0,008 | 0,007 | 0,001 | 0,001 |
| UQ-12 | 0,005 | 0,004 | 0,005 | 0,004 | 0,000 | 0,000 |

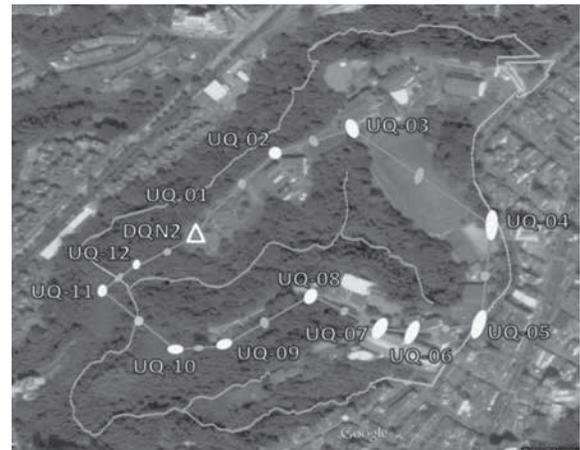


Fig. 9. Elipses de error absolutas y relativas, escala de distorsión: 1000 veces. Fuente: Google Earth

Las elipses relativas se consideran cuando importa conocer la precisión posicional de ubicación relativa entre dos puntos, es decir, qué tan bien está posicionada una estación respecto de la otra (Tabla IV), es así como se identificaron las líneas de mayor confiabilidad para orientar nuevos polígonos con fines de densificación: UQ11-UQ12, UQ06-UQ07, UQ09-UQ10.

TABLA IV.
MAGNITUDES ELIPSES DE ERROR RELATIVAS

| desde | hasta | s.my | s.mn | Az. s.mn |
|-------|-------|-------|-------|----------|
| UQ-01 | UQ-02 | 0,005 | 0,005 | 46° 40' |
| UQ-02 | UQ-03 | 0,005 | 0,005 | 32° 46' |
| UQ-03 | UQ-04 | 0,009 | 0,005 | 34° 45' |
| UQ-04 | UQ-05 | 0,005 | 0,004 | 100° 32' |
| UQ-05 | UQ-06 | 0,004 | 0,004 | 10° 40' |
| UQ-06 | UQ-07 | 0,005 | 0,002 | 81° 55' |
| UQ-07 | UQ-08 | 0,005 | 0,005 | 41° 01' |
| UQ-08 | UQ-09 | 0,006 | 0,005 | 133 38' |
| UQ-09 | UQ-10 | 0,004 | 0,003 | 80° 16' |
| UQ-10 | UQ-11 | 0,007 | 0,005 | 55° 20' |
| UQ-11 | UQ-12 | 0,003 | 0,003 | 167° 28' |

La propagación de errores del polígono permite verificar los intervalos de confianza que se deben utilizar para un trabajo determinado con el objeto de mantener los resultados dentro de los rangos de tolerancia en función de las observaciones y sus respectivos errores (Tabla V), en aquellos casos en que se pretenda producir nueva cartografía del campus, su actualización, o prácticas académicas de perfeccionamiento topográfico, estos valores deberán ser tenidos en cuenta para realizar las labores propias de control de calidad de dichas labores. Finalmente se obtuvieron las coordenadas ajustadas de cada una de las estaciones de la poligonal (Tabla V).

TABLA V.
COORDENADAS AJUSTADAS Y PROPAGACIÓN DE ERRORES PLANIMÉTRICOS

| Estación | Norte | Este | S_N | S_E |
|----------|------------|-------------|-------|-------|
| DQN2 | 995508,315 | 1157069,562 | 0,000 | 0,000 |
| UQ-01 | 995540,520 | 1157088,343 | 0,000 | 0,000 |
| UQ-02 | 995625,080 | 1157181,417 | 0,002 | 0,002 |
| UQ-03 | 995658,005 | 1157293,314 | 0,003 | 0,003 |
| UQ-04 | 995524,014 | 1157486,431 | 0,006 | 0,003 |
| UQ-05 | 995391,972 | 1157474,660 | 0,006 | 0,004 |
| UQ-06 | 995382,593 | 1157379,641 | 0,005 | 0,004 |
| UQ-07 | 995373,898 | 1157335,930 | 0,005 | 0,004 |
| UQ-08 | 995419,243 | 1157223,735 | 0,003 | 0,003 |
| UQ-09 | 995355,251 | 1157106,164 | 0,002 | 0,004 |
| UQ-10 | 995357,118 | 1157039,881 | 0,002 | 0,004 |
| UQ-11 | 995436,499 | 1156934,243 | 0,003 | 0,003 |
| UQ-12 | 995472,193 | 1156985,412 | 0,002 | 0,002 |

I. CONCLUSIONES

Se materializó mediante topografía clásica la poligonación de alta precisión (*marca de referencia*) en la cual se emplaza el territorio del campus universitario, a través de la ejecución de la metodología planteada se definieron los valores de incertidumbre posicional planimétrica de las estaciones topográficas mediante las *elipses de error* que constituyen un medio para analizar la fuerza geométrica del sistema, bajo este énfasis y de acuerdo con [50] quienes sostienen que una elipse alargada demuestra la existencia

de una mayor incertidumbre en una de las coordenadas, uno de los resultados de este trabajo es consecuente con tal afirmación, verificable en la Fig. 9 a través de las estaciones UQ-03, UQ-04, UQ-05, y UQ-09 y sus correspondientes desviaciones estándar fijadas en la Tabla V.

La gran mayoría de las elipses encontradas en la poligonal son alargadas desde el cuadrante NE al SW, esto sugiere que es desequilibrada a lo largo de tal dirección, esto se verifica con la dirección del error lineal que presenta una desviación ocho veces mayor sobre la proyección meridiana que sobre la paralela, esto se presenta porque un lado de la red (UQ-04 UQ-05) presenta poca resistencia a la rotación, evidenciado por las máximas longitudes de los semiejes de las elipses en estos vértices. Todo esto sugiere que la poligonal deberá ser fortalecida en la dirección del alargamiento de las elipses a través de la densificación de la poligonal y/o observaciones redundantes desde y hacia varias estaciones que puedan mejorar la geometría de las elipses acercándose a figuras más circulares que sugerirían equilibrio entre las observaciones angulares y la medición de distancias.

AGRADECIMIENTOS

Los autores reconocen las contribuciones del topógrafo Jair Ramírez destacado funcionario del Servicio Geológico Colombiano por el posicionamiento satelital de los puntos extremos de la línea base de este proyecto.

Así mismo expresan profunda gratitud a los Profesores Gilberto Gómez Gómez, y Jairo Díaz Jurado por iniciar el camino de la cientificación de la profesión.

REFERENCIAS

- [1] M. J. Sevilla, «Teoría de errores de observación.» Física de la tierra: geodesia marina y geoide, nº 5, pp. 133-166, 1993.
- [2] M. A. R. Cooper, Fundamentals of surveying measurements and analysis, London: William Clowes & Sons, 1974, p. 107.
- [3] R. Davis y F. Foote, Surveying: Theory and practice, 4th ed., New York: McGraw-Hill Book Company, 1967, p. 880.
- [4] S. V. Estopinal, A guide to understanding land surveys, 2nd ed., United States: John Wiley & Sons, Inc, 1993, p. 226.
- [5] R. Márquez, Introducción al ajuste y diseño de redes topográficas, San Juan: Universidad Nacional de San Juan, 2009, p. 180.
- [6] N. Ballesteros, Topografía, 1a ed., México, D.F.: Limusa, 1984, p. 474.
- [7] B. A. Barry, Errors in practical measurements in surveying, engineering, and technology, M. D. Morris, Ed., United States of America: Landmark Enterprises, 1991, p. 183.
- [8] A. Bannister, S. Raymond y R. Baker, Técnicas modernas en topografía, 7a ed., México, D.F.: Alfaomega, 2002, p. 550.
- [9] O. Trutmann, The theodolite and its application, Heerbrugg, Switzerland: Wild Heerbrugg, 1967, p. 110.
- [10] R. B. Buckner, «The Nature of Measurement: Part 3: Dealing With Errors,» Professional Surveyor Magazine, pp. 66-86, 1997.
- [11] J. Nathanson, M. T. Lanzafama y P. Kissam, Surveying fundamentals and practices, 6th ed., New Jersey: Prentice Hall, 1999, p. 502.
- [12] R. B. Bucner, Surveying Measurements and Their Analysis, 3th ed., California: Landmark Enterprises, 1991.
- [13] R. Martínez Marín, J. C. Ojeda Manrique, J. A. Sánchez Sobrino, J. G. Relas Ayuga y J. García García, Geodesia y Topografía, 1a ed., Madrid: Bellisco, 2004, p. 329.
- [14] J. Nathanson, M. Lanzafama y K. Kissam, Surveying fundamentals and practices, 5th ed., United States of America: Pearson Prentice

- Hall, 2006, p. 502.
- [15] W. Schofield y M. Breach, *Engineering Surveying*, 6th ed., Oxford: Elsevier, 2007, p. 622.
- [16] Fialowszky, L.; Holéczy, G.; «Surveying instruments and their operational principles.» *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 48, n° 4, pp. 41-42, 1991.
- [17] J. M. Anderson y E. D. Mikhail, *Survey: Theory and practice*, 7th ed., New York: McGraw-Hill, 1998.
- [18] R. Brinker y W. Taylor, *Elementary surveying*, United States of America: International Textbook Company, 1969, p. 686.
- [19] R. Shiu, S. Kang, J. Han y S. Hsieh, «Modeling Systematic Errors for the Angle Measurement in a Virtual Surveying Instrument.» *Journal of Surveying Engineering*, vol. 137, n° 3, pp. 81-90, 2011.
- [20] GUM, Guía para la expresión de la incertidumbre de medida, publicada por ISO en nombre del BIPM, IEC, IFCC, ILAC, ISO, IUPAC, IUPAP y OIML., 2008.
- [21] J. R. Smith, *Introduction to Geodesy*, 2nd ed., New York: John Wiley & Sons, 1997, p. 224.
- [22] F. H. Moffitt y J. D. Bossler, *Surveying*, 10th ed., United States of America: Addison Wesley Longman, Inc., 1998, p. 738.
- [23] C. Ghilani y P. Wolf, *Elementary surveying: an introduction to geomatics*, 13th ed., New Jersey: Pearson Prentice Hall, 2012, p. 931.
- [24] R. G. Bird, *EDM traverses*, New York: John Willey & Sons, 1989, p. 148.
- [25] ICSM, Intergovernmental Committee on Surveying and Mapping. *Guideline for Conventional Traverse Surveys: Special Publication 1*, 2013.
- [26] A. A. Seemkoei, «Comparison of reliability and geometrical strength criteria in geodetic networks.» *Journal of Geodesy*, vol. 75, n° 4, pp. 227-233, 2001.
- [27] C. A. Herubin, *Principles of Surveying*, 4th ed., Virginia: Reston Publishing Company, 1991, p. 301.
- [28] I. De Corral y M. de Villena, *Topografía de obras*, México D.F.: Alfaomega- Ediciones UPC, 2000, p. 354.
- [29] F. Domínguez García-Tejero, *Topografía general y aplicada*, 13a ed., Madrid: ediciones Mundi-Prensa, 1998, p. 811.
- [30] USACE, US Army Corps of Engineers, *Structural Deformation Surveying*, Washington DC: EM 1110-2-1009, 2002.
- [31] M. Ruiz Morales, *Nociones de topografía y fotogrametría aerea*, España: Editorial Universidad de Granada, 2003.
- [32] A. Tapia Gómez, *Topografía subterránea*, Cataluña: Ediciones UPC, 2005, p. 212.
- [33] B. F. Kavanagh, *Surveying with construction applications*, New Jersey: Pearson Prentice Hall, 2007, p. 681.
- [34] A. Amiri-Simkoei, J. Asgari, F. Zangeneh-Nejad y S. Zaminpardaz, «Basic Concepts of Optimization and Design of Geodetic Networks.» *Journal of Surveying Engineering*, vol. 138, n° 4, pp. 172-183, 2012.
- [35] R. Taton, *Topografía Subterránea*, Madrid: Paraninfo, 1977, p. 190.
- [36] L. Lupa-Dima y L. Filip, «Error propagation of the sizes measured in mine working.» *Revista Minelor - Mining Revue*, n° 2, pp. 32-34, 2012.
- [37] Y. E. Batista-Legrá y O. Belete-Fuentes, «Consideraciones sobre la exactitud de las redes de levantamiento topográfico.» *Minería y geología*, vol. 29, n° 3, pp. 56-64, 2013.
- [38] IPGH, Pan American Institute of Geography and History. *Manual de normas y especificaciones para levantamientos geodésicos de alta precisión en áreas pequeñas*, México: Comité de Geodesia IPGH, 1987, p. 51.
- [39] A. Del Bianco, *Topometría y microgeodesia. Notas de clase*, Córdoba: Universidad Nacional de Córdoba, 2001, p. 360.
- [40] D. Miranda Barrós, J. R. Rodríguez Pérez y J. C. Alonso, «Instalación de redes microgeodésicas como soporte para la gestión y mantenimiento de sistemas de información geográfica de ámbito municipal.» de *Teledetección. Avances y aplicación: VIII Congreso Nacional de Teledetección*, Albacete, 1999.
- [41] O. Cuadrado, L. Garcia-Asenjo, D. Hernández y A. Nuñez, «Planificación de redes de control de calidad en procesos cartográficos. El proyecto RGPA en el Principado de Asturias.» de *VIII congreso nacional de topografía y cartografía*, Madrid, 2004.
- [42] M. Farjas Abadía, *La Topografía y sus métodos: Principios de investigación*, Bilbao: Astrolabio, 2012, p. 500.
- [43] E. M. Mikhail y F. Ackerman, *Observations and least squares*, New York: University Press of America, 1983, p. 497.
- [44] G. Gómez Gómez y G. Jiménez Cleves, *Topografía analítica*, Armenia: Universidad del Quindío, 1994, p. 223.
- [45] C. D. Ghilani y P. R. Wolf, *Adjustment Computations*, 4th ed., New York: John Wiley & Sons, Inc., 2006, p. 611.
- [46] E. M. Mikhail y G. Gracie, *Analysis & Adjustment of Survey Measurements*, New York: Van Nostrand Reinhold, 1981, p. 368.
- [47] M. Chueca Pasos, J. Herráez Boquera y J. L. Berné Valero, *Tratado de Topografía. Tomo III. Redes topográficas y locales*. Microgeodesia., Madrid: Paraninfo, S.A, 1996c, p. 448.
- [48] IERS, «International Earth Rotation Service Annual Report.» Dick, Wolfgang R.; Richert, Bernd; Frankfurt am Main, 2000.
- [49] L. Sánchez Rodríguez, H. Drewes y H. Tremel, «Procesamiento de la red GPS básica de Colombia. Marco Geocéntrico Nacional MAGNA.» *Revista Cartográfica*, vol. 73, pp. 7-24, 2001.
- [50] M. Chueca Pasos, J. Herráez Boquera y J. L. Berné Valero, *Tratado de Topografía Tomo I. Teoría de errores e instrumentación*, Madrid: Paraninfo, S.A, 1996a, p. 522.
- [51] A. M. Ruiz Armenteros, J. L. García Balboa, J. L. Mesa Mingorance, J. J. Ruiz Lendínez y M. I. Ramos Galán, «Contribution of instrument centring to the uncertainty of a horizontal angle.» *Survey Review*, vol. 45, n° 331, pp. 305-314, 2013.
- [52] P. Richardus y J. S. Allman, *Project Surveying*, Amsterdam: North-Holland Publishing Company, 1966.
- [53] M. A. R. Cooper, *Modern theodolites and levels*, 2nd ed., Oxford: BSP professional books, 1987.
- [54] O. Baykal, T. Ergin, M. Z. Cozkun y E. Turan, «Accuracy of Point Layout with Polar Coordinates.» *Journal of Surveying Engineering*, vol. 131, n° 3, pp. 87-93, 2005.
- [55] E. D. Arrufat Molina, *Instrumentos Topográficos*, Valencia: Tirant lo Blanch, 2006, p. 693.
- [56] J. L. García Balboa, A. M. Ruiz Armenteros y J. L. Mesa Mingorance, «Evaluación de la incertidumbre de medidas en ángulos, distancias y desniveles medidos con instrumentación topográfica.» *Mapping interactivo*, 21 Septiembre 2011.
- [57] R. E. Deakin, «A review of Least Squares theory applied to traverse adjustment.» *Australian Surveyor*, vol. 36, n° 3, pp. 245-253, 1991.



Julián Garzón Barrero nació en Armenia (Quindío), Colombia, el 16 de Abril de 1977. Es Tecnólogo en Topografía por la Universidad del Quindío (Col.) 1999, Ingeniero de Sistemas por la Universidad San Martín (Col.) 2008, Especialista en Geomática por la Universidad Militar Nueva Granada (Col.) 2010, y Magister en Sistemas de Información Geográfica por la Universidad San Francisco de Quito (Ecu.) 2013.

Actualmente es profesor investigador en la Universidad del Quindío y la Universidad La Gran Colombia seccional Armenia, pertenece a los grupos de investigación GEOIDE G62 y Gerencia de la tierra. Entre sus áreas de trabajo investigativo se encuentran los Modelos Digitales de Elevación, Sistemas de Información Geográfica y el diseño de mediciones topográficas.



Gonzalo Jiménez Cleves nació en Ibagué (Tolima), Colombia, el 1 de Noviembre de 1962. Es Topógrafo por la Universidad del Quindío (Col.) 1985, Especialista en computación para la docencia por la Universidad del Quindío y la Universidad Antonio Nariño (Col.) 1989, y Magister en Ingeniería de Sistemas por la Universidad del Valle (Col.) 2004.

Actualmente es Director del Programa de Topografía de la Universidad del Quindío, además es profesor investigador en la Universidad del Quindío Armenia, pertenece al grupo de investigación GEOIDE G62. Entre sus áreas de trabajo investigativo se encuentran los Modelos Digitales de Elevación, Sistemas de Información Geográfica, modelación de superficies terrestres y el diseño de mediciones topográficas.



Ximena Cifuentes Wehima. Es Ingeniera Agroindustrial por la Universidad La Gran Colombia - seccional Armenia (Col.) 2000, Especialista en Fruticultura Tropical por la Universidad del Tolima (Col.) 2002, Especialista en pedagogía y docencia universitaria por la Universidad La Gran Colombia – seccional Bogotá 2004 (Col.) y Magister en desarrollo sostenible y medio ambiente por la Universidad del Manizales (Col.) 2010.

Actualmente es Decana de la Facultad de Ingenierías de la Universidad La Gran Colombia Seccional Armenia, además es profesora en la Universidad del Quindío Armenia, y es la líder del grupo de investigación Gerencia de la Tierra. Entre sus áreas de trabajo investigativo se encuentran la producción y desarrollo sustentable, gestión tecnológica para la productividad y procesos de formación y gestión de facultades de ingeniería.