

Establecimiento de una red geodésica principal y de densificación para la empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá

Wilmar Darío Fernández Gómez*

Tecnólogo en Topografía. Ingeniero civil. M. Sc. en Ingeniería-Infraestructura Vial
Docente tiempo completo, Facultad del Medio Ambiente y Recursos Naturales Universidad Distrital Francisco José de Caldas.

Pedro Sandoval Cavanzo

Dirección Técnica y Geográfica, Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá.

Raul Almarales

Ingeniero topográfico, Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá.

Waldo Sierra Gómez

Estudiante Ingeniería topográfica.

RESUMEN

Bogotá es una metrópoli que posee un área total de 1.732 km², con más de 6,6 millones de habitantes. La Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá realiza continuamente obras de infraestructura que garantizan un adecuado abastecimiento de agua potable y un cubrimiento en los sistemas de saneamiento sanitario y pluvial en el Distrito Capital. Para proyectar y construir el plan maestro de acueducto y alcantarillado de Bogotá, la empresa tuvo la necesidad de establecer una red vertical independiente, ya que no existía aún la red geodésica distrital, y con la cual se determinó una diferencia de 29,48 m con respecto a las cotas determinadas por el IGAC. Esta situación generó confusiones y complicaciones en varios proyectos de suministro y vertimiento de aguas residuales, por estas diferencias. Colombia adoptó desde el año 1999 el Marco Geocéntrico de Referencia Nacional (Magna), que es la densificación del proyecto Sistema de Referencia Geocéntrico para las Américas (Sirgas). Esta es la oportunidad en la cual la Empresa de Acueducto de Bogotá unifica el sistema de coordenadas al sistema Magna, situación que conviene al Distrito Capital ya que esta red propuesta por la empresa fortalece también la red determinada por el IGAC con la participación directa de la Universidad Distrital.

PALABRAS CLAVE: georreferenciación, red geodésica, posicionamiento, marco de referencia, estación, Magna, Sirgas, sistema de posicionamiento global.

ABSTRACT

Bogota is a big city with 6,6 million of people it lives in 1732 km² of area. The Company of Aqueduct and Sewer of Bogotá (EAAB) build infrastructure for comes the water to the people and build the pipe lines to send out the server waters and rain waters. To project and built the master plan of aqueduct and sewer, the company had to determinate a vertical net because Bogotá didn't have in this moment a geodesic net. When the Geographic Institute IGAC determinate the new geodesic net the difference with the EAAB net were 29,86 meters. This situation produced many confusions among new projects and the last projects. Since 1999 Colombia adopted the geocentric national reference Magna. It was a new reference marc in the Sirgas project. This new net was permit to unified the last net with the new geodesic net and it be part of solution about of few points to work in survey and geodetic projects.

KEY WORDS: georeference, geodesic net, positioning, reference mark, station, Magna, Sirgas, GIS.

* Enviar correspondencia a Wilmar Darío Fernández Gómez, Avenida Circunvalar Venado de Oro, tel. 0571-3376681, wfernandez@udistrital.edu.co

1. ANTECEDENTES

Bogotá tiene grandes problemas por la ausencia de vértices para georreferenciar los proyectos de infraestructura, debido a las obras de embellecimiento iniciadas a mediados del año 2000, al vandalismo, a la falta de coordinación entre las empresas durante la siembra de árboles, la construcción del sistema de transporte masivo Transmilenio, la colocación de postes de energía y teléfonos, que obstaculizan la intervisibilidad de los vértices geodésicos; además, la materialización y el mantenimiento físico de redes de control densas son costosos y poco redituables.

La red local de la ciudad de Bogotá ha contado con distintos tipos de vértices geodésicos y topográficos, los cuales han sido materializados y posicionados por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi, entre los que se encuentran:

- **T** (localizados para la empresa de Acueducto, son vértices topográficos de tercer orden)
- **CT** (ubicados en Cundinamarca, topográficos de tercer orden)
- **CX** (puntos topográficos auxiliares, topográficos de cuarto orden o fotogramétricos)
- **G** (puntos geodésicos, de primer orden)
- **CD** (localizados para Catastro Distrital, geodésicos de segundo orden)

Entre los años 1960 y 1990 Bogotá contaba con aproximadamente 4.000 vértices de los distintos tipos, es decir puntos T, CT y CX, además de la red geodésica distrital de segundo orden iniciada en el año 1990. En 1994 se materializan y reposicionan cerca de 800 puntos para remplazar los vértices destruidos y actualizar la red existente; en el año 2003, por las constantes quejas de los usuarios debido a la falta de vértices, el Instituto realizó un inventario con el cual se determinó el mal estado en el que se encontraba la red geodésica de la ciudad, por lo que se hizo un convenio con Catastro Distrital para la construcción y georreferenciación de 20 vértices en Bogot

tá de gran precisión, con las características de precisión de la red Magna que a su vez es la densificación de Sirgas en Colombia.

Actualmente el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC) únicamente certifica los vértices georreferenciados en el sistema Magna, que son aproximadamente 800 ubicados en el área metropolitana y en la parte de la zona rural del Distrito Especial de Bogotá (Sumapaz), entre los que se encuentran algunos de los CT, CX, CD y los nuevos CD-A.

2. MARCOS DE REFERENCIA

2.1 El sistema de referencia

Un sistema de referencia geodésico es un recurso matemático que permite asignar coordenadas a puntos sobre la superficie terrestre.

Deben distinguirse los llamados sistemas locales, que utilizan para su definición un elipsoide determinado y un punto *datum*, de los sistemas globales cuyos parámetros están dados por una terna rectangular (X, Y, Z) cuyo origen se encuentra en el geocentro del planeta. Para definir las coordenadas geodésicas (latitud, longitud y altura) cuentan con un elipsoide de revolución asociado. Esta es una definición rigurosa pero abstracta, pues tanto el centro como los ejes son inaccesibles en la práctica (International Earth Rotation and Reference System Service, IERS).

2.1.1 Marcos de referencia geodésicos

“Constituyen la materialización del sistema de referencia sobre la superficie terrestre. A los fines prácticos un sistema de referencia se materializa mediante un conjunto de mojones geodésicos implantados en una región, a los que se les han asignado coordenadas. Es claro que tales coordenadas han surgido de un cierto proceso de medición, estando, por lo tanto, afectadas de errores.

Es cierto también que a un mismo sistema de referencia puede corresponderle más de un marco producto de la materialización de dicho sistema en distintas zonas, países o regiones" (Iers).

2.1.2 Densificación del marco de referencia

"El esfuerzo requerido para la materialización de un sistema de referencia y los estándares que deben cumplir, hace que los marcos de referencia fundamentales estén constituidos por sólo un conjunto de vértices. Esto hace necesario un trabajo posterior de densificación a fin de hacer el sistema accesible al mayor número posible de usuarios" (International GPS Service for Geodynamics).

2.2 Sistemas de referencia celeste y terrestre

La Tierra se mueve en el espacio como un grano de polvo en un vendaval: gira alrededor del Sol a 30 kilómetros por segundo, y este astro se mueve a su vez a 30.000 kilómetros por segundo alrededor del centro de la Vía Láctea, que es solo una galaxia entre los millones de galaxias que efectúan un baile cósmico enlazadas por sus mutuas atracciones gravitacionales. Y, sin embargo, no percibimos ninguno de estos movimientos; la Tierra parece ser lo único firme e inmutable a nuestro alrededor. La distancia entre dos puntos fijos de la Tierra o la altura de otro con respecto a la superficie son tipos de medición bien definidos, que pueden repetirse tantas veces cuanto sea necesario, sin incertidumbre, pues la Tierra es un excelente sistema de referencia (ibíd.).

2.3 Las técnicas de observación

Los adelantos tecnológicos en la electrónica son la base fundamental de la informática y los sistemas de medición, los cuales han permitido la materialización de sistemas de referencia global, logrando así determinar po-

siciones sobre la corteza terrestre con gran precisión.

De otra parte, se resalta que el esquema geodésico bidimensional está siendo remplazado por una nueva concepción conocida con el nombre de geodesia tridimensional, la cual basa su principio en la determinación de las tres coordenadas que definen la posición de un punto sobre la superficie terrestre. En esta nueva concepción de la geodesia han contribuido las nuevas técnicas de medición como VLBI (Very Long Baseline Interferometry), LLR (Lunar Laser Ranging), SLR (Laser Ranging Service), Doris (Sistema de Orbitografía por Radioposicionamiento Doppler Integrado por Satélite) y GPS (Global Positioning System).

3. PLANIFICACIÓN Y EJECUCIÓN DE LA RED GEODÉSICA

3.1 Planificación de la red

En la planificación del trabajo se evaluaron los siguientes aspectos:

- Seguridad
- Ubicación y accesibilidad
- Diseño de la red
- Estándares para redes geodésicas

3.1.1 Seguridad

Partiendo de la premisa de establecer sitios con vigilancia continua, se optó por aprovechar los predios de la empresa, para el emplazamiento de los vértices, evitando la pérdida o destrucción involuntaria o deliberada de los mojones, y también se evaluaron las características morfológicas del terreno y las condiciones ambientales presentes, con el fin de garantizar su estabilidad y permanencia. Así mismo se buscó brindar seguridad a los usuarios y sus instrumentos para el desarrollo de trabajos topográficos o geodésicos dentro de las instalaciones de la empresa.

3.1.2 Ubicación y Accesibilidad

Los predios de la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá cuentan con un fácil acceso vehicular por vías y caminos transitables, ya que en ellos se ubican los embalses, plantas de tratamiento de agua potable y residual, tanques de distribución y rebombeo. Esto permite una mayor accesibilidad a los vértices de la red.

3.1.3 Diseño de la red

Para el diseño e implementación de la red y su densificación se buscó que la distribución de los vértices lograra satisfacer las necesidades de los usuarios. En la geometría de la red se tuvo en cuenta que la colocación de los vértices fuera equidistante para lograr al máximo su aprovechamiento en las técnicas geodésicas y topográficas, así como la integración con la red geodésica establecida por el IGAC para el Departamento Administrativo de Catastro Distrital (DACD). Dada la proximidad entre estos, se puede garantizar que se realicen labores topográficas convencionales o se utilicen como bases para realizar adecuadamente el ajuste de los vectores GPS con equipos de una sola frecuencia, si el área de trabajo se encuentra a menos de 10 km de los puntos de la red.

3.1.4 Estándares para redes geodésicas

En virtud del rápido desarrollo que en materia de posicionamiento satelital se viene dando alrededor del mundo y de la diversidad de equipos que se presentan en el comercio, con una extensa gama de exactitudes y precisiones a los usuarios, se hace necesario definir unos estándares para posicionamiento de acuerdo con la actividad a realizar. Su uso se ha acelerado en trabajos de levantamientos de alta precisión, debido al bajo costo que implica su uso, así como la gran precisión y reducido tiempo que se requiere para la determinación de posiciones, lo cual modifica las capacidades de

exactitud posicional espacial de puntos sobre o cerca de la superficie terrestre.

3.2 Ejecución de la red

En la ejecución del trabajo se establecieron seis etapas fundamentales:

- Reconocimiento de campo.
- Establecimiento de estaciones de rastreo permanente.
- Establecimiento de la red.
- Densificación de la red.
- Adecuación e instalación de torre para señal de azimut.
- Formatos.

3.2.1 Reconocimiento de campo

El reconocimiento consiste en las operaciones de campo destinadas a verificar sobre el terreno las características observadas en el análisis previo en la oficina, incorporando las condiciones y particularidades no previstas en el mismo, y su objetivo primordial es identificar las diferencias entre la situación ideal (planeación) y la situación existente apreciada en el terreno, a fin de establecer los sitios más apropiados para la materialización de la red y su densificación.

Es así como se visitaron los diferentes predios de la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá con el fin de evaluar las condiciones para la materialización de los vértices y su posterior posicionamiento.

En el reconocimiento se tuvieron en cuenta las siguientes condiciones:

- Terrenos que no estén sometidos a procesos de erosión, plegamientos o arqueamiento, para garantizar la permanencia de los vértices.
- Cielo despejado entre 10° y 15° desde el horizonte de la antena para evitar obstrucciones de la señal de los satélites.
- Evitar la existencia de superficies reflectantes a menos de 50 metros de las estaciones (como espejos de agua, techos metálicos o cubiertos de materiales re-

flectantes) para impedir el efecto Multipath.

- Torres de alta tensión o de generación de campos magnéticos.

Con el fin de obtener una ubicación relativa de los sitios, se hizo un posicionamiento autónomo, mediante el empleo de un receptor personal etrex con precisión aproximada de cuatro a veinte metros; dichos puntos fueron luego ubicados en la cartografía de la empresa para lograr su posición definitiva.

3.2.2 Establecimiento de las bases de rastreo permanente

Para trabajos de precisión en el posicionamiento tridimensional, es necesario un receptor de referencia. Dicho equipo (llamado usualmente base) se ubicó sobre un vértice de coordenadas conocidas ligadas al marco de referencia nacional, el cual permite el procesamiento diferencial con el receptor ubicado en el punto a posicionar (usualmente llamado móvil).

La idea básica de una estación de rastreo permanente GPS es obtener información de un punto "fijo" y un funcionamiento permanente en el tiempo; así se dispone de coordenadas de alta precisión que permiten apreciar variaciones en su posición que antes no se tenían en cuenta o no se conocían y que influyen notablemente en la determinación de un marco de referencia. Algunas aplicaciones son:

- La época de referencia.
- Modelos de movimiento de las placas tectónicas.
- Modelos de mareas terrestres y oceánicas.
- Deformación centrífuga por el movimiento del polo.
- Deformación por carga atmosférica.
- Levantamiento posglacial.

Todas estas variaciones se pueden apreciar ya que los procesamientos se realizan mediante software científico. Los más utilizados en el mundo son el Bernese del Insti-

tuto Astronómico de Berna (Suiza) y el Gipsy del Laboratorio de la Propulsión del Jet (JPL/NASA). Mencionamos a continuación algunas de ellas:

- Determinación de órbitas.
- Resolución de ambigüedades.
- Estimación de parámetros de rotación terrestre, movimiento del polo, mareas terrestres.
- Mejoras en la estimación del modelo troposférico.
- Capacidad para modelar la ionosfera y la troposfera.
- Procesamiento de observables GPS (código y/o fase).
- Capacidad de combinar y procesar datos de diferentes marcas de receptores.
- Parámetros de los relojes del satélite y del receptor.
- Variación de los centros de fase de antenas.
- Capacidad para procesar no solo Navstar sino también observaciones Glonass y combinar ambas observaciones.
- Capacidad para procesar observaciones SLR, Navstar y Glonass.

Con las estaciones de rastreo permanente GPS se consigue minimizar el área de incertidumbre de su posición, corrigiendo las tres principales fuentes de error en el posicionamiento satelital: la atmósfera, los datos de las efemérides y los relojes.

Estas cualidades proporcionan datos GPS de alta calidad a todos los usuarios y así se logra hacer parte de la red geodésica del país por sus estándares de precisión y calidad.

3.3 Característica de los receptores permanentes

La base de la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá cuenta con un receptor Leica 1220, con 12 canales para la portadora de la fase L1 y otros 12 para la portadora L2. Dispone de código C/A sobre la L1 y código P sobre la L2, aun cuando este está encriptado. Los da-

tos son registrados con una máscara de elevación de 10 grados y un intervalo de grabación de 10 segundos. Está equipada con una antena geodésica L1/L2 tipo *choke ring* AT302 y un cono protector contra la intemperie. El tipo de cable de la antena al receptor fue protegido con una coraza flexible de media pulgada.

La base de Madelena posee un receptor Ashtech Z Surveyor, con 12 canales para la portadora de fase L1 y otros 12 para la portadora L2. Los datos se registran con una máscara de elevación de 10 grados y un intervalo de grabación de 10 segundos. Está equipada con una antena geodésica L1/L2 Ashtech tipo ASH 701975.01A.

3.4 Recepción de la información

La información que se recibe se convierte a formato Rinex, el cual se realiza con el programa Leica Spider y los datos se almacenan en el sistema en intervalos de 12 horas. Para el caso de la segunda base la información se envía por Internet a la subdirección de topografía y geodesia de la EAAB.

3.5 Establecimiento de la red

3.5.1 Redes geodésicas

Es un conjunto de mojones o hitos denominados vértices geodésicos materializados sobre el terreno mediante una placa o disco de un material anticorrosivo empotrado que permite identificar el vértice. Para fijar su posición geográfica son georreferenciados, es decir, mediante el GPS se liga al marco de referencia mundial, nacional y local.

Estas redes son pasivas y deben reposicionarse en periodos no muy largos debido al movimiento de las placas tectónicas las cuales ocasionan desplazamientos de los vértices, apreciables en el tiempo.

La implantación de los vértices se adapta a las exigencias y a las condiciones propias del territorio y de la tecnología empleada,

para permitir su aprovechamiento de la red con técnicas como:

- Sistemas de Posicionamiento Global (GPS).
- Posicionamiento diferencial (posproceso).
- Posicionamiento diferencial en tiempo real (RTK).
- Pare y siga (*stop and go*).
- Estático rápido.
- Cinemática.

Estos vértices también se usan en procedimientos topográficos tradicionales como:

- Poligonación
- Triangulación
- Trilateración
- Radiación

Independientemente de la metodología empleada en la toma de datos topográficos, las redes geodésicas son la base fundamental de los sistemas de información geográfica necesaria para desarrollar las obras de infraestructura y ordenamiento territorial en el desarrollo de los países.

3.5.2 Monumentación de la red

Se escogió la mejor geometría para el establecimiento de la red con el reconocimiento previo en campo, el cual dio como resultado la determinación de 17 vértices distribuidos en los municipios de Usme, Sibaté, Soacha, Cota, Chía y la periferia del Distrito Capital.

Para la construcción de los mojones se emplearon dos métodos según las especificaciones de la División de Geodesia del Instituto Geográfico Agustín Codazzi (Guía para posicionamiento GPS).

4. RESULTADOS

Para el cálculo de la densificación de la red se utilizaron dos software comerciales, el *Spectrum Survey* Versión 3.20 y el *Leica Geo Office*. El primero de ellos se adquirió en calidad de préstamo a la Compañía Franco N. Hnos. Ltda.,

representante para Colombia de Sokkia Co. Ltda.; el segundo es propiedad de la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá.

Es de resaltar que una de sus principales aplicaciones en el campo de la Topografía es el procesamiento para líneas base de redes de control geodésico.

Las coordenadas geográficas GPS obtenidas en el sistema WGS84 se convirtieron a planas de Gauss-Krüger; como parámetro

se tomó "Aspectos prácticos de la adopción del marco geocéntrico nacional de referencia Magna-SirgaS26", como dátum oficial de Colombia, cuyo origen está dado por los siguientes parámetros:

$$\begin{aligned} \varphi &= 4^{\circ} 35' 46,3215'' \text{ N} \\ \lambda_0 &= 74^{\circ} 4' 39,0285'' \text{ W} \\ N_0 &= 1\,000\,000,0 \text{ m} \\ E_0 &= 1\,000\,000,0 \text{ m} \end{aligned}$$

Tabla 1. Conversión de coordenadas.

RED DE ACUEDUCTO SEGUNDA FASE					
COORDENADAS PLANAS GAUSS					
VÉRTICE	NORTE	ESTE	VÉRTICE	NORTE	ESTE
CD 369	1013311,831	999122,440	GPS 047	997555,106	990110,513
CT 1430	996465,788	1037002,996	GPS 048	998430,575	991770,531
GPS 004	986693,918	997604,559	GPS 049	1016430,107	1000867,586
GPS 005	988410,455	996302,898	GPS 050	978703,116	992829,286
GPS 008	993924,120	999858,415	GPS 051	978619,937	992614,186
GPS 010	999353,678	988338,367	GPS 052	1002253,883	986343,762
GPS 017	1015070,421	1006528,280	GPS 053	1013253,068	999334,012
GPS 018	1014963,377	1006808,697	GPS 060	1001261,671	1040480,762
GPS 019	1014669,531	1007117,515	GPS 061	1001042,350	1040529,465
GPS 021	1015464,786	1006539,723	GPS 062	997083,954	1041319,329
GPS 023	1016158,961	1007000,892	GPS 063	997057,578	1041482,121
GPS 024	1016383,312	1006651,704	GPS 064	993496,446	1038736,790
GPS 026	1016373,496	1000407,559	GPS 065	993389,326	1038239,094
GPS 028	1012367,928	993715,053	GPS 072	1011054,438	1025767,791
GPS 030	1007890,740	990428,131	GPS 073	1010812,839	1025757,069
GPS 031	1002940,750	989339,091	GPS 076	992207,203	1033761,657
GPS 033	995123,084	992290,279	GPS 077	992055,940	1034550,049
GPS 034	995741,470	993002,189	GPS 078	992818,620	1036557,067
GPS 035	993339,190	996789,152	BAJO TEUSACA	1039571,651	1011318,198
GPS 036	996439,763	993276,664	BAJO TEUSACA 1	1039459,718	1010248,517
GPS 040	995836,076	998841,208	SAN RAFAEL 1	1012254,044	1010071,905
GPS 042	989225,290	1000069,272	SAN RAFAEL 2	1012140,736	1008566,016
GPS 043	987505,655	998522,153	S.A.Z ALPES 2	993702,461	991424,913
GPS 044	995473,511	998989,074	S.A.Z GPS 020	1015809,956	994814,600
GPS 045	997519,955	995005,229	S.A.Z VOLADOR	994416,908	991308,037

4.1 Análisis

En el análisis se evaluaron los resultados de los dos programas a fin de establecer la con-

sistencia de la red, mediante el uso de herramientas estadísticas.

4.1.1 Modelo estocástico

Una observación geodésica, por ejemplo una dirección, distancia o diferencia de cotas, es una variable aleatoria o estocástica. Una variable estocástica no puede describirse por un solo valor exacto, ya que existe una gran incertidumbre involucrada en el proceso de medición. Por ejemplo, al medir repetidamente la distancia entre dos estaciones, se obtendrá un amplio rango de diferentes valores. Esta variación se toma en cuenta para calcular la probabilidad de la distribución. Lo anterior significa que, además del modelo matemático, es necesario formular un segundo modelo que describa las desviaciones de las observaciones: el modelo estocástico.

En el caso de observaciones geodésicas, se asume una probabilidad de distribución normal. Esta distribución se basa en la media μ y la desviación estándar σ .

La media μ representa el valor matemático que se espera de la observación. La desviación estándar es una medida de la dispersión o extensión de la probabilidad. La desviación estándar caracteriza a la precisión de la observación, al cuadrado de σ se lo llama varianza. Por definición, existe un 0,6827 de probabilidad de que las variables estocásticas con distribución normal se encuentren en una región limitada por $(-\sigma$ y $+\sigma)$.

En la región limitada por $(-1,96\sigma$ y $+1,96\sigma)$, esta probabilidad es de 0,950. Y para la región limitada por $(-2\sigma$ y $+2\sigma)$, esta probabilidad es de 0,954. En general, la probabilidad de que una variable estocástica tome un valor entre $(x_1$ y $x_2)$ es igual al área delimitada por la curva y las ordenadas $(x_1$ y $x_2)$, la cual se representa por el área sombreada de la gráfica 1.

Es posible que dos o más observaciones sean interdependientes o estén correlacionadas, lo cual significa que la desviación de alguna repercutirá en la otra. La correlación entre dos observaciones X y Y se expresa matemáticamente por la covarianza (σ_{xy}). La covarianza se emplea también en el coeficiente de correlación, definido como:

$$\rho = \frac{\sigma_{XY}}{\sigma^X \sigma^Y}$$

El coeficiente toma valores entre

$$-1 \text{ y } +1: -1 \leq \rho \leq 1$$

Si las observables no son interdependientes, $\rho = 0$. Los elementos vectoriales (DX,DY) de una línea base GPS constituyen un ejemplo de observables correlacionados. En esencia, el modelo estocástico consiste en la elección de la probabilidad de la distribución de los observables. Prácticamente, esto significa que para cada observable se elige una desviación estándar σ . El valor de σ se basará en el conocimiento que se tenga del proceso de medición (condiciones prevalecientes en el terreno, tipo de instrumento empleado) y en la experiencia. Se supone que la desviación estándar de la mayoría de los observables presenta una parte absoluta y una parte relativa. En la parte relativa se toma en cuenta la dependencia que existe entre la distancia de la estación y el punto a medir, la cual caracteriza la precisión de la mayoría de los observables.

A continuación se presentan los resultados de las diferencias para los vértices, producto de la comparación entre los dos programas.

Gráfica 1. Vértices de la red.

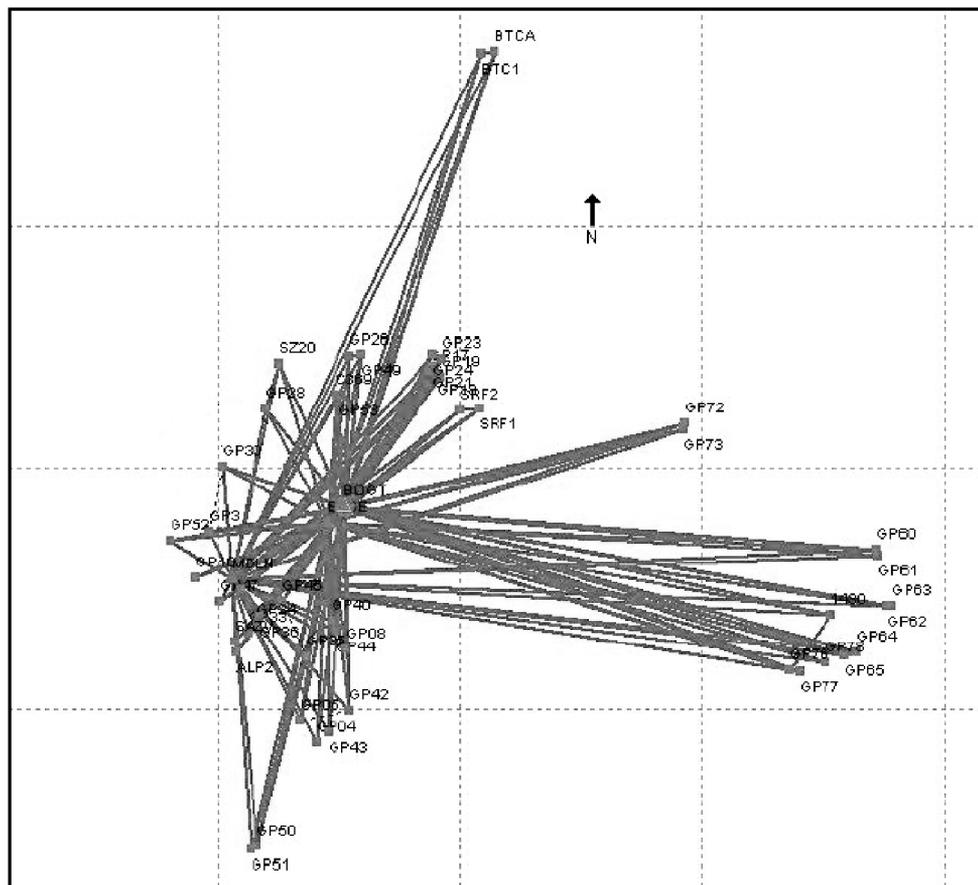


Tabla 2. Diferencia de coordenadas.

VÉRTICE	DELTA DE DIFERENCIA		VÉRTICE	DELTA DE DIFERENCIA		VÉRTICE	DELTA DE DIFERENCIA	
	NORTE	ESTE		NORTE	ESTE		NORTE	ESTE
BAJO TEUSACÁ	-0,1040	0,0370	GPS 031	0,0760	0,0030	GPS 060	-0,0280	-0,0580
BAJO TEUSACÁ 1	-0,1180	0,0130	GPS 033	0,0330	0,0440	GPS 061	-0,0210	-0,0490
CD 369	-0,0110	-0,0090	GPS 034	0,0200	0,0060	GPS 062	0,0160	-0,0670
CT 1430	-0,0170	0,0210	GPS 035	0,0180	0,0160	GPS 063	0,0050	-0,0550
GPS 004	0,0390	-0,0310	GPS 036	0,0440	-0,0060	GPS 064	0,0040	-0,0490
GPS 005	0,0400	0,0030	GPS 040	-0,0440	-0,0620	GPS 065	0,0240	-0,0550
GPS 008	0,0250	0,0160	GPS 042	0,0390	-0,0160	GPS 072	0,0450	0,0270
GPS 010	0,0120	0,0210	GPS 043	0,0430	-0,0220	GPS 073	-0,0040	-0,0370
GPS 017	-0,0440	-0,0300	GPS 044	-0,0260	-0,0580	GPS 076	0,0180	0,0310
GPS 018	-0,0420	-0,0430	GPS 045	0,6260	2,0450	GPS 077	0,0550	-0,1080
GPS 019	-0,0380	0,0090	GPS 047	0,0110	-0,0130	GPS 078	-0,0110	0,1700
GPS 021	-0,0460	-0,0030	GPS 048	0,0350	-0,1050	SAN RAFAEL 1	-0,0040	-0,0370
GPS 023	-0,0240	-0,0270	GPS 049	-0,0060	-0,0090	SAN RAFAEL 2	-0,0210	-0,0240
GPS 024	-0,1290	-0,0650	GPS 050	0,0630	-0,0310	S.A.Z ALPES 2	0,0290	0,0460
GPS 026	-0,0150	-0,0130	GPS 051	0,0750	-0,0180	S.A.Z GPS 020	-0,0060	0,0400
GPS 028	-0,0450	0,0310	GPS 052	0,0200	0,0490	S.A.Z VOLADOR	0,0230	0,0240
GPS 030	0,1490	-0,0870	GPS 053	-0,0180	-0,0090			

Tabla 3. Estadística de las diferencias de coordenadas.

N =	50	
$\mu =$	0,0153	0,0291
$\sigma =$	0,099480501	0,29167356
RANGO	0,115	0,321
	-0,084	-0,263
$1,96\sigma =$	0,194981781	0,57168018
RANGO	0,210	0,601
	-0,180	-0,543
DATOS FUERA DE RANGO 68,4%	5	
DATOS FUERA DE RANGO 95,0%	1	
$\rho =$	0,0249	
$\sigma_X \sigma_Y$	0,0290	
$-1 \leq \rho \leq 1$	0,8577	

Los estándares de posicionamiento se expresan a través de la región establecida por el círculo de error probable (CEP), para las coordenadas que definen la posición horizontal de un punto o por medio del intervalo de confianza del 95%.

En un análisis comparativo más riguroso para una distribución normal del 68,27%, se determinó que el 90% de las diferencias en coordenadas procesadas por estos programas caen dentro de ella, y para un intervalo de confianza del 95% de la distribución, el 98% de las diferencias cumplen con los estándares de calidad en el posicionamiento.

4.2 Errores absolutos y errores relativos

De otra parte, durante el posicionamiento se tomaron las distancias entre algunos vértices para comparar las distancias en terreno y las derivadas de los cálculos, con el fin de establecer las diferencias en la georreferenciación de los vértices.

El *error absoluto* en una cantidad es la diferencia entre el valor verdadero, suponiendo que se conoce, y una aproximación al valor verdadero.

Así, si:

X = cantidad verdadera

\bar{X} = una aproximación a la cantidad verdadera

e_x = error absoluto.

Tenemos que:

$$x = \bar{X} - e_x$$

De acuerdo con nuestra definición:

$$e_x = x - \bar{X}$$

El *error relativo* se define como el cociente del error absoluto entre la aproximación

$$\frac{e_x}{\bar{X}} = \frac{x - \bar{X}}{\bar{X}}$$

Parecería más razonable definirlo como el error absoluto dividido entre el valor verdadero, pero generalmente no conocemos este. Todo lo que tenemos, generalmente, es un valor aproximado y una estimación del error o un límite al tamaño máximo del error.

El error absoluto y el error relativo son aproximadamente iguales para números cercanos a uno. Para números no cercanos a uno puede haber una gran diferencia ("Confiabilidad de los modelos matemáticos en ingeniería", inédito).

Durante el posicionamiento se tomaron algunas distancias entre los vértices para hacer una comprobación entre las distancias obtenidas del procesamiento de los datos y las obtenidas en terreno. Para ello se empleó un prisma triple cuyo alcance es de 3.000 metros, y una estación Nikon DTM 730; esta serie se caracteriza por su precisión: $\pm 2 + (2\text{ppm} \times D)$ mm en modo preciso.

4.3 Precisiones

Con los resultados obtenidos a partir del reporte Leica, el cual determinó 133 polígonos, se realizó una desviación estándar para determinar el nivel de confiabilidad del 95% en la precisión.

Tabla 4. Estadística de precisión.

PRECISIÓN	
N =	133
m =	2614060,6015
1,96 σ =	3816613,2720
RANGO	6430673,8732 -1202552,6702
DATOS FUERA DEL RANGO 95%	6
PORCENTAJE FUERA DEL NIVEL DE CONFIABILIDAD DEL 95%	4,5%
PORCENTAJE DENTRO DEL NIVEL DE CONFIABILIDAD DEL 95%	95,5%

Tabla 5. Estadística del cierre.

CIERRE	
N =	127
m =	0,1326
1,96 σ =	0,915044699
RANGO	1,0477 -0,7824
DATOS FUERA DE RANGO 95%	2
PORCENTAJE FUERA DEL NIVEL DE CONFIABILIDAD DEL 95%	1,6%
PORCENTAJE DENTRO DEL NIVEL DE CONFIABILIDAD DEL 95%	98,4%

El procesamiento de los datos de observaciones GPS permite establecer una precisión promedio de 1: 2.614.061 por cada polígono.

Esta precisión es válida para 127 de los 133 vértices calculados; los 6 restantes están fuera del rango de la desviación estándar; en otras palabras, la confiabilidad del ajuste para nuestro estado del arte es de 95,5% del total de poligonales.

Los límites de la desviación estándar de los datos de precisión permiten establecer que la longitud de los vectores para estos vértices y la geometría del momento de la ocupación fueron óptimas.

4.4 Error de cierre

Obviando los seis polígonos del cálculo obtenido anteriormente, se observa que el error de cierres de 127 polígonos está en el orden de 0,1326 m y la desviación registrada es de más o menos 0,9150 m. El nivel de confiabilidad es del 95%.

Los datos fuera del rango porcentual son dos polígonos, equivalentes al 1,6%, lo cual demuestra que el 98,4% se encuentra en un grado de confiabilidad del 95%.

Si se toma en cuenta la precisión de las redes geodésicas en Colombia, encontramos que la consistencia de la antigua red Arena para el datum Bogotá se encuentra en el orden de 30 cm. Por otro lado, las campañas y ajustes aplicados para la generación de la nueva red de Magna presentan una consistencia de ± 2 cm hasta ± 6 cm, según fuente IGAC; la consistencia para este primer ajuste de la red de la EAAB está dentro de un orden de ± 13 cm, como lo presenta el error visto anteriormente.

Es importante aclarar que el estado del arte en que nos encontramos actualmente no nos permite aún en Colombia obtener ajustes de redes geodésicas de mayor precisión; por tal motivo ha sido necesaria la colaboración de entidades y universidades extranjeras para la consecución del proyecto Magna y muy seguramente de la red de la EAAB.

La red de la EAAB tiene actualmente una mayor solidez en sus vértices dadas las condiciones de seguridad y estabilidad de los mismos; además se cuenta con la posibilidad de instalar otra antena de rastreo continuo que permitirá en un plazo de 2 a 3 años el monitoreo de la red y un mejor ajuste de acuerdo con su geodinámica.

5. CONCLUSIONES

La densificación de la red geodésica para la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá prioriza en eficacia y eficiencia los proyectos de corto, mediano y largo plazo en el Distrito Capital; su posterior mantenimiento demanda un gran esfuerzo técnico, económico, administrativo y social, lo que implica para el Acueducto realizar luego los análisis técnicos con relación a las normas nacionales e internacionales; se determina la posibilidad de alternativas comerciales con otras entidades del Distrito Capital, que van de la mano con la prestación del servicio de la red geodésica, la experiencia y el manejo que ofrece la Dirección de Información Técnica y Geográfica del Acueducto de Bogotá y la Universidad Distrital Francisco José de Caldas.

El proyecto permite unificar el sistema de coordenadas de la empresa más grande de servicios públicos de Bogotá, con el sistema oficial que es determinado por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi.

La densificación de puntos y el establecimiento de diferentes monumentos en la periferia de la ciudad permitirá la utilización de dichos puntos por la comunidad académica, topográfica, geodésica y el público en general.

El cálculo de las coordenadas, en algún software científico, de las estaciones permanentes permitirá conocer datos importantes para realizar otro tipo de análisis, por ejemplo de subsidencia de la capital de la república.

La red obtenida cumple con los estándares de precisiones a nivel nacional e internacional, con un nivel de confianza del 95%, para los trabajos topográficos que diariamente realiza la EAAB.

6. RECOMENDACIONES

Dada la cantidad de predios que posee la EAAB, es necesaria su actualización al nuevo sistema de referencia nacional; para ello se requiere la continuación de la densificación de la red.

Se requiere contar con nuevas bases de referencia para brindar cubrimiento en el establecimiento de nuevos vértices y su eventual posicionamiento. Por lo tanto es conveniente que las estaciones de rastreo permanente instaladas actualmente en el Distrito Capital sean ajustadas en sus coordenadas de tal forma que haya consistencia entre las mismas.

Se recomienda que todos y cada uno de los vértices de la red tengan un control vertical generado a partir de nivelaciones geodésicas.

Es conveniente que los vértices sean ocupados cada dos años con el fin de realizar un seguimiento a la geodinámica que los afecta.

Para contribuir al desarrollo de las actividades de georreferenciación que tienen lugar en el área urbana de la ciudad de Bogotá, es necesario que las redes creadas por las instituciones gubernamentales sean avaladas por el IGAC.

Se debe realizar un convenio interinstitucional entre la EAAB y la Universidad Distrital Francisco José de Caldas para realizar la nivelación geodésica y el establecimiento de los vértices que hagan falta dentro de la densificación de la red geodésica, de manera que la red cumpla con los estándares de calidad nacional e internacional.

Las coordenadas obtenidas se convirtieron al nuevo sistema de referencia nacional; se indica que deben ser llevadas al año 1995.

7. BIBLIOGRAFÍA

Adopción del Marco Geocéntrico Nacional de Referencia Magna-Sirgas como datum oficial de Colombia. Agosto 2004.

Decretos No. 2113/1992 y 208/2004.

DMA Technical Report 8350.2 (1987). Department of Defense World. Geodetic System 1984, Its Definition and Relationships with Local Geodetic Systems.

El agua en la historia de una ciudad. Tomos 1 y 2. Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá, septiembre de 1997.

- Especificações e Normas Gerais para Levantamentos GPS, Diretoria de Geociências da Fundação Instituto Brasileiro de Geografia e Estatísticas. Dezembro 1992.
- Estándares Geodésicos. Subcomité de Geodesia del C.N.U.G.G.I. Argentina. Normas Técnicas para Levantamientos Geodésicos. Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (INEGI).
- Glosario de Términos Geodésicos. Instituto Panamericano de Geografía e Historia, 1977.
- HOYER, M., WILDERMANN, E., ACUÑA, G. Curso de Extensión Modernos Sistemas Geodésicos de Referencia. 2000.
<http://www.ibge.gov.br/home/geografia/geodesico/pdf>.
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi, Marco Geodésico para Colombia, 1999.
- LYN, Squire, VAN DER TAK, Herman G. *Análisis económico de proyectos*. Editorial Tecnos, Madrid, 1980.
- MIRANDA M., Juan José. "Gestión de Proyectos". *Identificación, formulación, evaluación financiera, económica, social, ambiental*. Quinta edición. 2005.
- MOIRANO, J. F. Materialización del Sistema de Referencia Terrestre Internacional en Argentina, mediante observaciones GPS. 2000.
- SALAZAR, V., NAHMENS, A. Procesamiento de las Mediciones del Perfil GPS alrededor del Lago de Maracaibo. 1996.
- SEEBER, Günter. *Satellite Geodesy*. Walter de Gruyter, Berlin – New York, 1993.
- SIRGAS. Relatorio Final Grupos de Trabalho Repots. Instituto Brasileiro de Geografia e Estadística, Rio de Janeiro, agosto 2001.
- SIRGAS. Boletín informativo No. 6.
- SIRGAS. Sistema de Referencia Geocéntrico para América do Sul. Relatorio Final, Grupos de Trabajo I y II. Instituto Brasileiro de Geografia e Estadísticas. Rio de Janeiro, 1997.