

## Determinación, corrección y ajuste de coordenadas GPS para las fases de vuelo, aproximación y aterrizaje. Desarrollo de un sistema GBAS para el aeropuerto de Nemocón (Cundinamarca)

### Determination, Correction and Adjustment GPS Coordinates for the Flight Phases, Approach and Landing. GBAS System Development for Airport Nemocón (Cundinamarca)

Juan Ricardo Barragan Currea<sup>1</sup>

**Para citar este artículo:** Barragan, J. (2015). Determinación, corrección y ajuste de coordenadas GPS para las fases de vuelo, aproximación y aterrizaje. Desarrollo de un sistema GBAS para el aeropuerto de Nemocón (Cundinamarca), PP 1-14

Fecha de Recepción: 20 de febrero de 2015

Fecha de Aceptación: 20 de octubre de 2015

#### Resumen

En el transporte aéreo mundial se emplea el sistema de posicionamiento global (GPS, por su sigla en inglés). Con su precisión, continuidad y cobertura, este método ofrece servicios de navegación sin obstáculos, que satisfacen en su mayoría las necesidades aerociviles. El sistema de navegación permite a la aeronave volar rutas de mayor demanda, entre puntos perfectamente definidos e independientes, o asistidos por infraestructura terrestre.

Esta investigación se concentra en las dos últimas fases de vuelo, las aproximaciones y el aterrizaje, monitoreando estas etapas con un sistema de aumento basado en infraestructura terrestre (GBAS, por su sigla en inglés), se logró determinar y demostrar la vinculación de una tecnología en proceso, al sistema público de la aviación.

Dada la complejidad del sistema fue necesaria la ejecución de ensayos prácticos prueba y error en los cuales se identificó por medio de simulaciones computacionales y representaciones matemáticas los posibles errores que se encontrarían en la ejecución del mismo, dichas simulaciones se realizaron en el módulo ArcScene del software

ArcGIS de la casa ESRI.

Se estableció una red de puntos de control terrestres para el monitoreo constante de la aeronave, esta red consta de cuatro estaciones GPS de alta precisión, distribuidas de la siguiente manera: tres en el aeródromo y una más para control de aproximación ubicada en el municipio de Zipaquirá, a 7,5 km de la pista.

Para la última fase de la investigación se desarrolló una aplicación móvil, la cual controla en tiempo real los desplazamientos horizontales y verticales de la aeronave, convirtiéndose en una ayuda sistematizada en el funcionamiento del GBAS. La Aeronáutica Civil de Colombia financió un vuelo de prueba en el que se ejecutó en su totalidad el diseño y trabajo en marcha del sistema de aeroayuda espacial propuesto por los autores de la investigación.

**Palabras clave:** sistema de navegación por satélite, sistema de aumento basado en infraestructura terrestre, levantamiento en tiempo real.

<sup>1</sup>Universidad de Cundinamarca, Ingeniero Topográfico, Correo electrónico: [juan.barragan@geoplan.com.co](mailto:juan.barragan@geoplan.com.co)

## Abstract

In the global air transport is used the Global Positioning System (GPS). With its precision, coverage and continuity, this method provides unobstructed navigation services that meet the needs mostly civilians Aero.

The navigation system allows the aircraft to fly higher demand routes between points perfectly defined and independent or assisted ground infrastructure.

The research focuses on the last two phases of flight, and landing approaches, monitoring these stages with a system of terrestrial infrastructure based augmentation system (GBAS), was able to determine and demonstrate the linkage of process technology, the public system aviation.

Given the complexity of the system was necessary to carry out field trials "trial and error" which was identified by means of computer simulations and mathematical representations for any errors that would be in the execution, these simulations

were performed in ArcGis modulle called ArcScene from ESRI.

A network of ground control points for constant monitoring of the aircraft, this network consists of four high-precision GPS stations, distributed as follows: three at the aerodrome and approach control more located in the municipality of Zipaquirá to 7.5 km of track.

For the last phase of the research was developed a mobile application, which controls real-time horizontal and vertical movement of the aircraft. Becoming a systematic assistance in the operation of GBAS.

Colombia's civil aeronautics funded a test flight which fully implemented the design supported and ongoing work of the aid system Aerospace proposed by the authors of the research.

**Keywords:** System Navigation Satellite, Ground-Based Augmentation System infrastructure, real-time survey.

---

## INTRODUCCIÓN

La navegación aérea es el conjunto de técnicas y procedimientos que permiten conducir eficientemente una aeronave a su lugar de destino, basada en observaciones meteorológicas o similares y del terreno mediante datos obtenidos por instrumentos de vuelo.

En la actualidad estos instrumentos no proporcionan integridad suficiente para garantizar un monitoreo constante en todas las fases que comprenden un vuelo. Las tecnologías en la navegación aérea se han ido implementando de manera ineficaz, omitiendo el uso de herramientas satelitales, como el sistema de posicionamiento global (GPS, por su sigla en inglés). El sistema global de navegación satelital (GNSS) se está utilizando en el mundo para dar solución a necesidades de carácter militar y civil,

proporcionando así ayudas de navegación y orientación en dispositivos, sistemas de localización (emergencias), geomática y seguimiento (rastreo). La ayuda de los datos aportados por instrumentos en la navegación aérea contempla dentro de sus avances la implementación de GNSS en todas las fases de vuelo.

Dentro de estas nuevas herramientas de navegación aérea se encuentra el sistema de aumento basado en infraestructura de tierra (GBAS, por su sigla en inglés). El cual determina la posición de la aeronave con base a puntos conocidos de un alto grado de exactitud. Es muy importante acotar que en la actualidad ninguno de los GNSS operativos puede utilizarse por sí solo como método único de navegación aérea. Hay dos causas principales por las que ocurre esto: en primer lugar, el GPS es de naturaleza militar y no hay garantía de su operación continua para

usuarios civiles. En segundo lugar, ninguno de los GNSS proporciona actualmente integridad, es decir, la garantía de que el piloto reciba de manera rápida y automática la advertencia de que el sistema tiene una falla y dejó de funcionar adecuadamente.

Los sistemas de navegación por satélite tienen una estructura claramente definida, que se divide en tres segmentos distintos: un segmento espacial, un segmento de control, un segmento de usuario. No se entiende un GNSS sin alguno de estos tres elementos.

Esta investigación se concentró en las dos últimas fases de vuelo, la aproximación y el aterrizaje. Al monitorear estas etapas con un sistema de aumentación se logra determinar la vinculación de una tecnología en proceso, al sistema público de la aviación.

Para la prueba final de funcionamiento, puesta en marcha y metodología se realizó un sobrevuelo, del aeropuerto de Guaymaral a la pista de Nemocón. Usando como única herramienta de navegación la aplicación desarrollada GBAS. Se usó un avión Cessna 172 Skyhawk, probablemente el avión de entrenamiento más popular del mundo.

## **MATERIALES Y METODOS**

La Investigación se desarrolló en el marco del convenio de cooperación entre el proyecto curricular de Ingeniería Topográfica de la Universidad Distrital, el Servicio Geológico de Colombia y la Aeronáutica Civil.

La implementación del sistema de aumento basada en infraestructura terrestre se situó en el aeródromo en construcción del municipio de Nemocón (Cundinamarca) a 65 kilómetros de la ciudad de Bogotá (Colombia). Para la construcción al 100% de un GBAS, se requiere la intervención de varias disciplinas; el alcance del proyecto se limita al desarrollo específico de la academia de la ingeniería

topográfica.

Para un mejor entendimiento y desarrollo metodológico el presente trabajo de investigación se concibió por diferentes fases operativas.

### **1. Recopilación de información base, definición de variables y planteamiento de ensayos**

El posible funcionamiento del GBAS se determinó a través de un ensayo en la Universidad Distrital, cuyo objetivo fue determinar y simular una la línea de vuelo en tierra, mediante la conformación de dos puntos GPS, que representarían el punto de partida y llegada de la aeronave, la línea que se forma de los dos puntos será la ruta de vuelo. Para efectos de un entorno real se levantaron datos en campo, correspondientes a un levantamiento topográfico.

De los resultados gráficos se puede evaluar que una correcta configuración del equipo GPS brinda mayor cobertura en cuanto a densidad de puntos; así se evidencia claramente en las rutas el camino verdadero que se realizó en campo.

El ensayo demostró que el diseño de los puntos de control debe ser de gran precisión, además de dar un patrón de tolerancia para la simulación del GBAS.

### **2. Reconocimiento en campo, prediseño de la red geodésica GBAS**

Con los resultados de la primera fase del proyecto, se consideran los aspectos a trabajar; como topografía aislamientos, además del prediseño de la red en el aeródromo. Los criterios de diseño de la red no se encuentran especificados ni unificados para el GBAS, además de la cantidad de puntos que se requieren; mientras en algunos países prefieren varias estaciones permanentes otros

prefieren contar con solo una y varios puntos pasivos de apoyo.

El diseño que se efectuó está determinado con la posibilidad de tener en un futuro en el aeropuerto una estación permanente. En principio se diseñan cuatro puntos de los cuales tres están en el aeródromo y uno de aproximación en el VOR de Zipaquirá; los tres puntos del aeródromo están ubicados aproximadamente cada 500 metros, cubriendo la primera etapa en construcción de la pista.

Tres de estos son patrocinados por el Instituto de Geología y Minería de Colombia, puntos denominados Nem1 y Nem2, ubicados en los costados de la pista, y el punto VZIP. Se instaló otro punto en la pista denominado Nem3 UD, a cargo de la Universidad Distrital y la Aeronáutica Civil.

Se realizó un reconocimiento en campo, anterior a la construcción de la primera fase de la pista, con el cual se pudo deducir la extensión del área a trabajar, los posibles obstáculos para la señal GPS, entre otros.

Los datos de análisis de las superficies de obstáculos son suministrados por la aeronáutica civil, de los cuales se busca la mejor localización de la red de apoyo del GBAS.

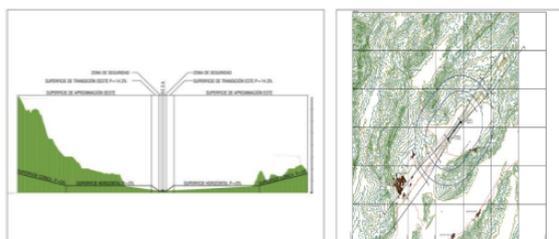


Figura 1: Alturas mínimas de operación

### 3. Diseño, construcción y posicionamiento de la red geodésica GBAS

En compañía de Ingeominas se determinó y aprobó la ubicación de las estaciones GPS, además se adoptó la metodología para la

construcción de las mismas. El diseño inicial de la red Geodésica GBAS se contempló una estación GPS para la cabecera sur de la pista; la construcción de esta no fue posible en este sitio ya que presenta problemas de inundación.



Figura 2: Instalación varilla

La instalación de la varilla de 4 metros de profundidad (figura 2) establece un parámetro de seguridad del punto GPS, debido a la profundidad es menos perceptible a cambios en su posición o movimientos generados por operaciones de construcción.

### Posicionamiento u ocupación GPS

La ocupación GPS de las estaciones de control GBAS se realizó entre los días 23 al 28 de abril de 2012, a cargo de Ingeominas. Una sesión continua de cinco días con equipos Topcon CR-4 y Zephyr Geodetic 2, se realizó para los puntos NEM1, NEM2 y VZIP respectivamente.

La altura instrumental para cada uno de los puntos fue de un metro; para lograr que la recepción fuera ininterrumpida se instaló una serie de dispositivos: una cajuela en aluminio alberga el colector del equipo y una batería de larga duración proporciona energía suficiente

para una ocupación de cinco o más días.



Figura 3: Receptor GPS

El punto de control GBAS, denominado NEM3 UD, se posicionó con un equipo Tremble 4000ssi en dos sesiones de siete horas cada día.



Figura 4

### Preprocesamiento GPS

Los archivos obtenidos en campo fueron preparados, editados y liberados de problemas con la herramienta Teqc, hasta obtener archivos en formato RINEX. Para el caso de archivos en formato T00 se usó la herramienta R-Utilities de Trimble que permite convertirlos en archivos tipo .dat.

Las condiciones generales de preprocesamiento fueron:

- Obtener un solo archivo por cada día de observación para cada estación.

- Limpiar observaciones que no estén completas.
- Verificar los saltos en el rastreo, si existen, para comprobar el correcto funcionamiento del receptor.
- Establecer correctamente el intervalo de observación con el cual se debe generar el archivo RINEX.
- Verificar que el número mínimo de cuatro (4) satélites requeridos para cada observación estén presentes en cada archivo, y que el número máximo de satélites por observación no supere los doce (12) permitidos.

### Procesamiento

El procesamiento de datos GPS se divide en dos fases principales: preparación de los datos e integración de estos en una solución diaria. Se emplean órbitas precisas, las cuales pueden adquirirse de algunos de los centros International GNSS Service (IGS).

El procesamiento científico requiere y exige la obtención de datos de estaciones permanentes GPS y de campo de alta calidad, lo cual garantiza la producción de resultados confiables. En esencia, el éxito del procesamiento lo establece la selección de estaciones de rastreo, que cubren tanto de manera espacial como temporal el área de estudio, así como el alcance de orbitas corregidas.

Dentro del procesamiento se realiza corrección ionosférica, retardo en los relojes y troposfera, una corrección diferencial especial a partir de una estación de rastreo permanente, ubicada en Ingeominas Bogotá.

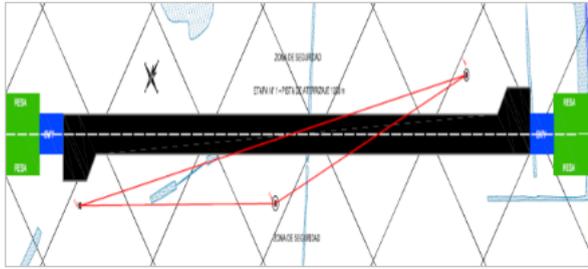


Figura 5: Red geodésica GBAS

#### 4. Prueba GBAS, simulación de despegue, aterrizaje y aproximaciones desde un automóvil

La prueba se realizó el viernes 6 de abril de 2012, con equipos Trimble 4000ssi configurados uno como BASE y otro como ROVER. La estación base se instaló en el punto GPS NEM1 en la cabecera norte de la pista, el cual estuvo posicionando durante el transcurso de la prueba.

La estación ROVER se instaló en la parte superior del vehículo, con el objetivo de garantizar una mejor recepción y cobertura de la señal GPS.



Figura 6: Prueba GBAS

En el interior del vehículo se aseguró el controlador del ROVER, el cual permitió gestionar los datos durante el recorrido de la prueba. La ejecución de la prueba inició en la cabecera norte de la pista, monitoreando el recorrido del vehículo a lo largo de la misma.



Figura 7

La prueba se efectuó de manera satisfactoria garantizando así que el equipo GPS no sufriera ningún tipo de anomalía, además de realizar varios recorridos con diferentes velocidades.

| Prueba   | velocidad | Registro fotográfico |
|----------|-----------|----------------------|
| Prueba 1 | 120 km/h  |                      |
| Prueba 2 | 100 km/h  |                      |
| Prueba 3 | 90 km/h   |                      |
| Prueba 4 | 80 km/h   |                      |

Tabla 1: Prueba GBAS

En la tabla 1 se muestra las diferencias que presentan los puntos con mayor desfase en el recorrido de cada prueba. Las diferencias muestran que aunque en campo el vehículo transcurrió en línea recta se visualizan desfases muy altos.

## 6. Definición control GBAS

La evaluación del sistema de aumentación GBAS para el municipio de Nemocón presentó un panorama más claro, el cual permitió cambiar el concepto de navegación inicial.

El control del vehículo es muy complejo además de impreciso, al operar por puntos independientes. En el momento de escalar el sistema a una velocidad de operación de una aeronave, no será posible mantener el control y monitoreo de la ruta.

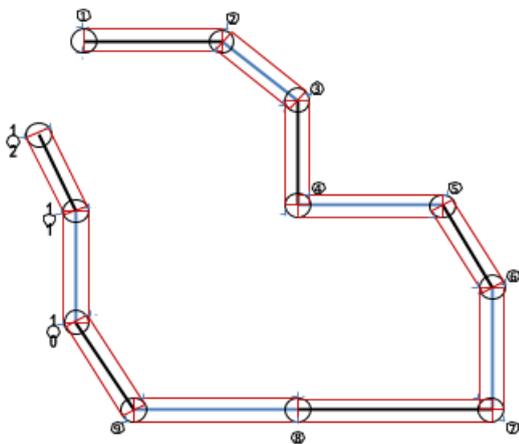


Figura 8

Viendo tal problemática se desarrolló el concepto de segmentos definidos por polígonos unidos entre los puntos de navegación, es decir se generó visualmente un túnel virtual en tres dimensiones, lo cual garantiza el control segmentado de manera horizontal y vertical.

El monitoreo en sentido vertical debe ser riguroso, ya que teóricamente se puede

llevar el curso definido y realizar un aterrizaje perfecto sin nunca haber tocado la pista.

Definiendo al túnel cada uno de sus segmentos, además de la tolerancia vertical, horizontal se obtiene algo como lo que se muestra en la figura 10.



Figura 9

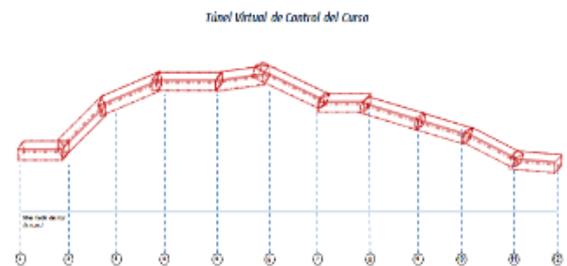


Figura 10

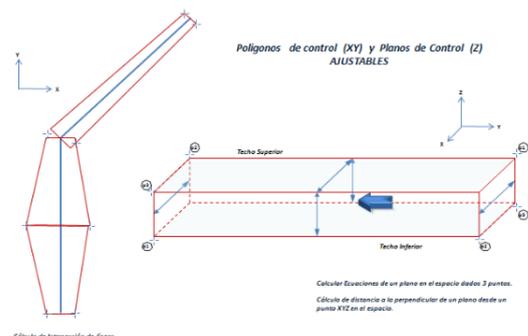


Figura 11

Se logró la construcción de una base de datos, la cual debe en su contenido

mínimo poseer la identificación del punto y su coordenadas (norte, este, cota).

El control de aproximación no es constante, existen tramos del recorrido en los cuales no hay necesidad de establecer un control exhaustivo, por el uso de otras ayudas de navegación como por ejemplo los VOR. Lo anterior permite establecer rangos más amplios de tolerancia.

Control diferente se define para los tramos en donde se debe controlar detalladamente cada movimiento de la aeronave.

## RESULTADOS

### Desarrollo metodológico y matemático, aplicación GBAS municipio Cundinamarca

Definiendo clases de control, procesos matemáticos estructurados, formularios de inserción de datos, y además ejecuciones de manejo propio de la terminal, se concibió una ayuda sistematizada para el proyecto GBAS. El aplicativo se desarrolló para la plataforma de Windows Mobile. Cualquier máquina, terminal o equipo bajo este sistema operativo puede ejecutar sin problemas el programa.

### Especificaciones, desarrollo y funcionamiento aplicación GBAS



Figura 12

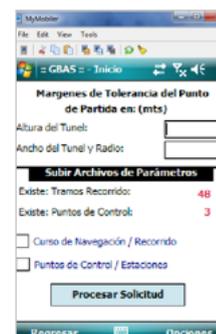
El aplicativo móvil consta de cuatro pantallas principales; el desarrollo es propiedad intelectual de los autores del Proyecto GBAS con el acompañamiento, aprobación y gestión del ingeniero Adolfo Gómez, director del Departamento de Sistemas y Desarrollo de Montajes de Ingeniería de Colombia.

El aplicativo se desarrolló y se probó como parte final del proyecto de investigación GBAS, con fines académicos e innovación, agosto de 2012.

### Parámetros del sistema

Se definen los parámetros con los cuales se calcula, onstruye y define el túnel virtual de control GBAS.

Para el punto de partida se ingresan los valores de tolerancia en altura, ancho y radio, para los demás puntos se debe cargar un archivo plano (\*.txt) con una estructura como la que se muestra a continuación:



### Puntos de Control



Figura 13

El motivo por el cual se construyen estaciones GPS de tal precisión, es garantizar el control de aproximación a puntos perfectamente definidos en los cuales puede funcionar más de una aeroayuda.

El concepto usado para este control recae nuevamente en un radio de tolerancia y el monitoreo constante de la posición actual del usuario Vs. La posición de la estación.

Cuando la posición del usuario se encuentra dentro del radio de tolerancia se marca la casilla “Dentro” que intuitivamente quiere decir que el encargado del equipo se encuentra cerca o aproximándose al punto. Además de controlar si se encuentra dentro o fuera del radio de tolerancia, el aplicativo realiza un cálculo de la distancia en metros, que se muestra en el costado derecho de la pantalla. El sistema de aumento propuesto controla y monitorea constantemente la posición receptionada por el equipo GPS abordo y la posición de las estaciones o tramos de recorrido.



Figura 14

## Navegación

La navegación a partir de distancias se vuelve un control plano, difícil de monitorear y de precisiones muy bajas, por tal motivo se desarrolló un módulo dinámico de pilotaje.

La imagen que se muestra en el módulo

“Navegación” (figura 15) representa el túnel virtual por donde (teóricamente) siempre debe estar la aeronave, se indica de manera gráfica la dirección a la cual se debe alinear el usuario, y cumplir con los parámetros definidos inicialmente.

Cada vez que se alcance un punto de tramo se activa una señal sonora, indicando el siguiente punto objetivo.

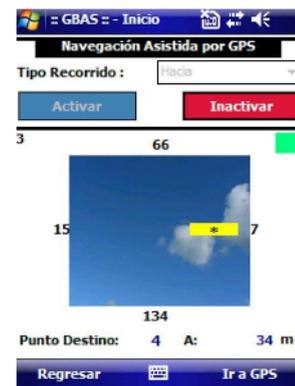


Figura 15

En la parte superior derecha en modo “Navegación” activo, se muestra un recuadro de color verde para cuando se cumplan las condiciones de navegación requeridas, y en el momento de encenderse rojo indica que la posición de la aeronave está fuera del curso diseñado.



Figura 16: Fuerzas sobre el libro y diagrama de cuerpo libre para un libro

## Datos GPS

La información relevante de trabajo del aplicativo es la recepción de las coordenadas GPS, por esta razón se implementó un módulo “Datos GPS” que permite visualizar la coordenada actual, la velocidad de desplazamiento, el rumbo al punto objetivo, entre otros.

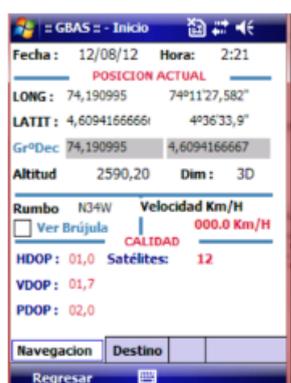


Figura 17

Para la recepción de las coordenadas GPS, se establecieron criterios que mejoran la calidad de la posición.

Un mínimo de seis satélites de observación directa, al igual se estableció un HDOP máximo de 9 y una selección de satélites por encima de los 30 grados.

El módulo “Datos GPS” da la oportunidad de monitorear información directamente del sistema de posicionamiento global, como por ejemplo: Hdop Vdop, entre otros.

La posición actual se puede mostrar de dos formas: una en formato GG.MM.ssss, y otra en formato grados decimales. Este módulo al igual que el de navegación, desarrolló un control de orientación para mejorar el desplazamiento en ruta. El cual muestra el rumbo hacia el destino o punto objetivo, distancia y las coordenadas en proyección plana.

## Prueba aplicativo GBAS

Posterior al desarrollo y concepción del aplicativo móvil “proyecto GBAS” se realizaron varias pruebas de funcionamiento, puesta en marcha, corrección de errores, entre otros, siendo objetivo principal el correcto funcionamiento en el momento de la prueba final a bordo de una aeronave.

Algunas pruebas se realizaron en tramos cortos donde la navegación no exigiera mucho la máquina, y el control de desplazamiento y velocidad fuera muy manejable.

Se definen varios radios de tolerancia, para los puntos de control y los tramos de ruta.

## Resultados para los puntos de control

Sobre un segmento de 780 metros aproximadamente se desarrolló la simulación de la pista en una calle de la ciudad de Bogotá.

Extrapolando coordenadas del *software Google Earth*, de 12 puntos secuenciales sobre el centro de la vía se establecieron los tramos de ruta, además se definen cuatro puntos de control, uno para determinar y controlar aproximación, y los demás para el control sobre la simulación de la pista.



Figura 18

El módulo de navegación siempre estuvo testeando la posición de manera satisfactoria,

arrojando resultados de precisión muy buenos, HDOP por debajo de 1 y verticales por debajo 2.3.

En las primeras pruebas del aplicativo surgió un error, el cual consistió básicamente sobre el control vertical, la pantalla donde se grafica siempre mostraba valores fuera del rango, aunque se le aumentara la tolerancia a valores superiores, el resultado siempre era el mismo.

El aplicativo trabaja sobre un principio de cartesianidad, lo que quiere decir que a partir de un punto cero (0) hacia la izquierda o hacia abajo los valores se convierten en negativos, motivo por el cual la comparación de la posición y los puntos de diseño siempre serían distintos.

Se le define como solución al error inesperado arrojar los valores de los cálculos de las distancias en valor absoluto.

Se logró tener el control de navegación en varios tramos, en algunos se generó un error de cálculo para las tolerancias del ancho.

Para que la aplicación empezara a navegar y definir el curso del punto objetivo, debió encontrar o posicionarse dentro del radio de tolerancia, a partir de este momento se ejecutó todo el concepto de curso dirigido y controlado.

Se evidenció que el aplicativo necesitaba de dos puntos o completar un segmento para empezar con el cálculo de la ruta.

El condicional inicial tenía un error en el código fuente de la aplicación, estaba definido para un segmento de recta y no para un punto individual de inicio o partida. Se deja el control para el radio y tolerancia de un punto individual y a partir de este se ejecuta la navegación GBAS.

Cada vez que se alcanzaba un punto de tramo de control, en la base de datos el estado cambió de “o” a “ok”, lo cual permitió iniciar la búsqueda del siguiente. Se generó un error que al terminar el ciclo o todo el trayecto de ruta, la aplicación seguía buscando infinitamente registros y al no obtener datos bloqueaba la terminal.

Sobre el código del aplicativo se definió un final de ejecución, además de un condicional de “último registro” que funcionó de forma similar al punto inicial.

El concepto de navegación se cumple y las pruebas reflejan y permiten la corrección de algunos de los errores.

### **Prueba Final GBAS**

La prueba final de GBAS se basa en la integración de todos los conocimientos y herramientas adquiridas. Comprende la utilización de la aplicación de navegación satelital generada en un vuelo.

La Aeronáutica se comprometió en brindar las garantías necesarias para la ejecución de esta prueba final, para tal fin gestionó los permisos necesarios, los servicios de vuelo; también se encargó de la aeronave que se utilizó en la prueba.

Las pruebas realizadas de la aplicación móvil “proyecto GBAS” determinaron la corrección de errores para esta prueba, lo que tuvo como resultado un buen funcionamiento de la aplicación en la aeronave.

El sistema de aproximación funcionó correctamente. Para la realización de la prueba final se usaron dos terminales móviles equipadas con GPS.

## DISEÑO DE LA RUTA



Figura 19

## VISTA DE PERFIL VUELO GUAYMARAL - NEMOCON

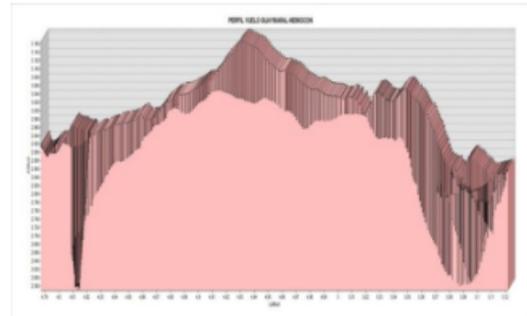


Figura 22

## MONITOREO DE APROXIMACIÓN A LAS ESTACIONES GPS

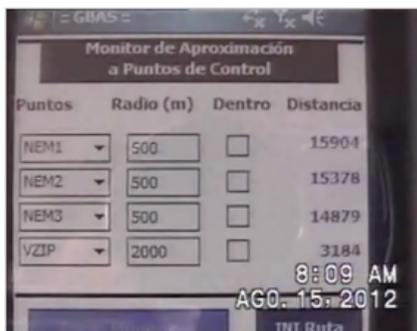


Figura 20

## VISTA DE PERFIL VUELO GUAYMARAL - NEMOCON

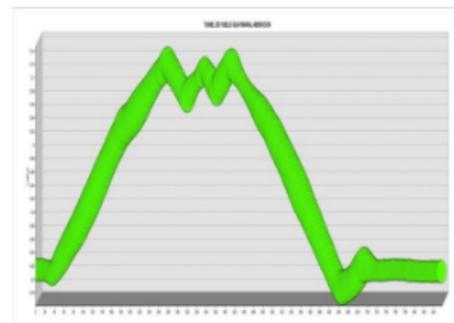


Figura 23



Figura 21

## CONCLUSIONES

Se desarrolló un sistema de aumentación basado en infraestructura terrestre (GBAS) para el municipio de Nemocón (Cundinamarca), cumpliendo con los requerimientos establecidos inicialmente.

Un sistema de aumento requiere de la integridad de varias disciplinas. Se logró un desarrollo importante en el campo de acción específico del ingeniero topográfico.

Para la primera prueba, donde se definió el concepto de navegación usado en la investigación, se obtuvo que las coordenadas resultantes divergen en centímetros y en

algunos puntos en metros del diseño inicial, lo que equivale a un error de acuerdo con la pequeña longitud de la línea del modelo inicial. Según las pruebas realizadas se cumplió con el desarrollo de un sistema coordinado de alta precisión.

Se definió por cálculos matemáticos la creación del túnel virtual en tres dimensiones, asegurando y monitoreando la posición actual del usuario.

La creación de una aplicación móvil es uno de los grandes aportes de la investigación, con la cual se realizó la última fase de prueba en ruta y aproximación guiada por coordenadas GPS en tiempo real.

Para el recurso de ajuste y control de los puntos GPS es conveniente tener una estación permanente, que para este proyecto se decidió utilizar las estaciones cercanas del Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC), en Bogotá.

Se determinó y se construyó una red geodésica de cuatro puntos GPS de alta precisión, tres de ellos supervisados por el Instituto Colombiano de Geología y Minería (Ingeominas), y uno más por los autores de la investigación y supervisado por la Universidad Distrital y la Aeronáutica Civil. Esta red permitió controlar de manera eficiente y eficaz cada movimiento coordinado dentro del sistema.

La posición de las estaciones GPS permitió controlar matricialmente el proceso, creando un circuito ordenado de norte-sur sobre el área de desarrollo.

En contraste con la metodología mundial del diseño de la red GBAS, se construyó una red que no fuera redundante, que tuviera más cobertura y fuera menos costosa. Esta metodología fue planteada e implementada por los autores del proyecto, y aprobada por la Aeronáutica Civil.

El punto de control NEM2 cumplió con todos los requerimientos específicos, técnicos y aprobación de Ingeominas, para que un futuro sea instalado sobre una estación permanente de monitoreo constante.

Se logró una aproximación casi perfecta al diseño inicial propuesto, las distancias de desfase en algunos punto no supera los 20 cm.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Aérea, N. (s.f.), de Navegación aérea: <http://nacc.upc.es/navegacion-aerea/x196.html>

Álvarez, D. A. (Enero de 2008). Escuela técnica superior de Sistema GNSS.

Álvarez, D.A. (2008). Sistema GNSS (global navigation satellite system). Madrid: Universidad Autónoma de Madrid.

Hegarty, C.G. y Chatre, E. (2008). Evolution of the Global Navigation Satellite System (GNSS). Proceedings of the IEEE, 96(12), 1902 y ss.

Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC) (s.f.). Guía metodológica y práctica para el uso de GPS. Bogotá.

Keller, W. (2003). Observation Techniques in Satellite Geodesy.

Mtnez. V., J.F. y Valiente, R. (2003). Navegación, sistemas y equipos, maniobras y procedimientos.

NASA. (s.f.). International GNSS Service. Recuperado de: <http://igsceb.jpl.nasa.gov/>

Organización de Aviación Civil Internacional (OACI) (2005). Manual sobre el Sistema Mundial de Navegación por Satélites (GNSS). Doc. 9849. 1a. ed.

Determinación, corrección y ajuste de coordenadas GPS para las fases de vuelo, aproximación y aterrizaje. Desarrollo de un sistema GBAS para el aeropuerto de Nemocón (Cundinamarca)  
Barragan Currea, J. (2015)

---

Rummel, R. (2011). Reference Systems in Sa-

telite Geodesy. Múnich: Institut Fur Astro-  
nomische and Physikalische Geodasie.