
Propuesta De Emplazamiento Para La Implementación Del Segmento Terrestre De Un Sistema Tipo SBAS En El Territorio Colombiano

Presentado por

**Christian Yesid Rincon Garcia
Juan Manuel Mosquera Medina**



LOS LIBERTADORES
FUNDACIÓN UNIVERSITARIA

Fundación Universitaria Los Libertadores

Facultad de Ingeniería y Ciencias Básicas

Programa de Ingeniería Aeronáutica

Bogotá D.C, Colombia

2019

2019

Propuesta De Emplazamiento Para La Implementación Del Segmento Terrestre De Un Sistema Tipo SBAS En El Territorio Colombiano

Presentado por

**Christian Yesid Rincon Garcia
Juan Manuel Mosquera Medina**

en cumplimiento parcial de los requerimientos para optar por el

Título de

Ingeniero Aeronáutico

Dirigida por

Jaime Enrique Orduy Rodríguez M.Sc

Codirector

Iván Felipe Rodríguez Barón M.Sc

Presentada a

Programa de Ingeniería Aeronáutica

Fundación Universitaria Los Libertadores

Bogotá D.C, Colombia.

2019

2019

Notas de aceptación



LOS LIBERTADORES

FUNDACIÓN UNIVERSITARIA

Firma del presidente del jurado

Firma del jurado

Firma del jurado

Bogotá DC, noviembre de 2019.



LOS LIBERTADORES

FUNDACIÓN UNIVERSITARIA

Las directivas de la Fundación Universitaria Los Libertadores, los jurados calificadores y el cuerpo docente no son responsables por los criterios e ideas expuestas en el presente documento. Estos corresponden únicamente a los autores y a los resultados de su trabajo.

Dedicatoria



Dedico este proyecto a mis padres quienes me han apoyado durante estos cinco años llenos de retos y aprendizaje, igualmente a todas las personas que me apoyaron durante el proceso.

Juan Manuel Mosquera Medina

Quiero dedicar este proyecto de grado primeramente a Dios, ya que gracias a él he logrado culminar mi carrera.

A mis padres, porque ellos siempre estuvieron a mi lado brindándome su apoyo y sus consejos para hacer de mí una mejor persona.

A mis hermanos, especialmente a mi hermano Luis ya que ha sido un pilar muy importante para alcanzar esta meta tan importante en mi vida.

Christian Vesid Rincon Garcia

Agradecimientos



Agradecemos primeramente a nuestros padres por su esfuerzo y sacrificio, porque sin ellos no habríamos tenido la posibilidad de culminar esta meta tan importante para nosotros.

En segundo lugar, al Ing. Jaime Enrique Orduy Rodríguez que gracias a él este proyecto fue posible. Por lo tanto, queremos agradecerle por sus consejos y asesoramiento profesional para la realización de este proyecto.

Por último, también queremos agradecer al Ingeniero Edward Cepeda de la UAEAC por brindarnos la información necesaria para culminar este proyecto.

Índice general

Índice general.....	13
Resumen	25
Abstract	27
Capítulo 1 Introducción	29
Capítulo 2 Planteamiento del Problema	31
2.2 Justificación	37
2.3 Metodología.....	39
2.3.1 Diseño metodológico	39
Capítulo 3 Marco Teórico	41
3.1 Navegación Aérea.....	41
3.2 Navegación Por Radio	42
3.3 Concepto GNSS	42
3.3.1. Limitaciones del GNSS	42
3.4 Constelación De Satélites	43
3.4.1 GLONASS	43
3.4.2 GALILEO	43
3.4.3 GPS.....	44
3.5 Fuentes De Error De Los GPS	44
3.6 Ionosfera Terrestre	45
3.7 Sistemas De Aumentación.....	46
3.7.1. ABAS (<i>Aircraft Based Augmentation System</i>):	46
3.7.2. GBAS (<i>Ground Based Augmentation System</i>):	46
3.7.3. SBAS (<i>Satellite Based Augmentation System</i>):	46
3.8 ¿Qué es SBAS?	47
3.8.1. Sistemas SBAS operativos:	47
3.9 Beneficios de SBAS.....	48
3.10 Arquitectura SBAS	49
3.10.1. Segmento espacial	50
3.10.2. Segmento de soporte	51
3.10.3. Segmento usuario	51
3.10.4. Segmento tierra	51
3.11. Red de estaciones de monitoreo	51
3.11.1. Estaciones maestras o centro de procesamiento	52
3.11.2. Centro de control de satélites	52
3.11.3. Capa de comunicación.....	53
3.12. Antenas Del Segmento Tierra	53
3.12.1. Antenas del subsistema de monitoreo.....	53

3.12.2. Estaciones maestras o centros de procesamientos	54
3.12.3. Centro de control de satélites	55
Capítulo 4	57
Estado del Arte	57
4.1. Sistema GAGAN	57
4.2. Sistema EGNOS	59
4.3. Sistema SACCSA	62
Capítulo 5	65
Propuesta de emplazamiento para la implementación del Sistema SBAS en Colombia ..	65
5.1. FASE I: Criterios Para Identificar Estratégicamente Las Zonas Aéreas Más Transitadas Dentro Del Territorio Colombiano	65
5.1.1. Carta De Navegación – Datos Experimentales	67
5.1.2. Planes De Vuelo Teóricos	69
5.2. FASE 2: Criterios Para El Emplazamiento De Las Estaciones De Referencia	72
5.2.1. Propuesta de ubicación de las estaciones de referencia y maestra preliminar	72
5.2.2. Ubicación detallada de las estaciones de referencia preliminar	74
5.3. Ingeniería inversa GAGAN	77
5.3.1 <i>Checklist</i> emplazamiento de las seis estaciones de referencia seleccionadas:	82
5.3.1.1 RIMS 1 RIOHACHA	83
5.3.1.2 RIMS 4 SAN ANDRÉS	84
5.3.1.3 RIMS 3 CAREPA	85
5.3.1.4 RIMS 5 PIEDECUESTA	86
5.3.1.5 RIMS 7 CALI	87
5.3.1.6 RIMS 10 MITÚ	88
5.4. FASE 3: Simulación En Radio Mobile En Zonas Col, Car/Sam (Centro-Sur)	89
5.4.1. Cobertura de Colombia, zonas CAR/SAM	92
5.4.2. Detalles de la ubicación de las estaciones de referencia	94
5.5. FASE 4: Estación Maestra	96
5.5.1. Ionosfera Terrestre	96
5.5.2. Disponibilidad De Satélites GPS En La Región Ecuatorial	99
5.5.3. Arquitectura Estación De Referencia	101
5.5.4. Simulación STK Enlace Antenas RIMS Y Constelación GPS	102
5.5.5. Arquitectura Comunicación Constelación GPS – Estaciones De Referencia (RIMS)	104
5.6. FASE 5: COMUNICACIÓN DE ENLACE	106
5.6.1. Envío de Datos del Sistema de Comunicación	106
5.6.2. Distancia Entre las Estaciones de Referencia y la Estación Maestra ...	107
5.6.3. Arquitectura Comunicación Estación de Referencia (RIMS) – Estación	

Maestra	109
5.6.4. Simulación STK Comunicación Entre Estación de Enlace y Satélite	
Inmarsat	111
Capítulo 6 Resultados y Discusión.....	114
6.1. Resultados	114
6.1 Discusión	119
Capítulo 7 Conclusiones y Recomendaciones	121
Bibliografía	124
Apéndice A	127
Apéndice B	129
Apéndice C.....	136
Apéndice D.....	164
Apéndice E.....	166

Índice de Figuras

Figura 1. Mapa de estaciones de VOR/DME	35
Figura 2. Operating in Satellite-Based Augmentation System (SBAS) Airspace	48
Figura 3. Egnos service provision	50
Figura 4. Egnos Service Provision	53
Figura 5. Feasibility Study and Site Choice for an EGNOS Station in Algeria	54
Figura 6. Feasibility Study and Site Choice for an EGNOS Station in Algeria	54
Figura 7. Understanding GPS: principles and applications	55
Figura 8. Egnos Service Provision	55
Figura 9. India's Satellite-Based Augmentation System GAGAN	63
Figura 10. Configuración de estaciones de referencia	65
Figura 11. Mejores resultados observados en las pruebas	64
Figura 12. Peores resultados observados en las pruebas	64
Figura 13. Vuelo internacional que pasa por Colombia.	66
Figura 14. Esquematización teórica de las 31 rutas aéreas evaluadas	71
Figura 15. Posible ubicación de las estaciones de referencia y maestra en Colombia	74
Figura 16. Emplazamiento detallado estaciones de referencia y maestra preliminar	76
Figura 17. Ionosfera	77
Figura 18. Efecto ionosférico	78
Figura 19. Perímetro y área de cobertura de sistema GAGAN	79
Figura 20. Distancia entre RIMS GAGAN	79
Figura 21. Simulación de las 15 estaciones de referencia GAGAN	80
Figura 22. Distancia entre antenas RIMS en Colombia	81
Figura 23. Comparación entre GAGAN y SBAS Colombia	81
Figura 24. Ubicación de antenas RIMS para cobertura CAR	90
Figura 25. Ubicación de antenas RIMS para cobertura SAM-CENTRO/COL	91
Figura 26. Ubicación de antenas RIMS para cobertura SAM	92
Figura 27. Ubicación de las seis antenas RIMS para cobertura del territorio colombiano y zonas SAM/CAR	93
Figura 28. Modelo ionosférico de Klobuchar	96
Figura 29. Maximum Vertical Total Electron Values and Spatial Gradients Statistical Analysis	99
Figura 30. Órbita del satélite Inmarsat 3F-5	100
Figura 31. Cobertura de satélites GEO en zona ecuatorial	100
Figura 32. Diseño de la estación de referencia	101
Figura 33. Simulación seis antenas RIMS.	102
Figura 34. Constelación GPS	103
Figura 35. Simulación recepción con antenas RIMS de la señal GPS	103
Figura 36. Arquitectura comunicación entre constelación GPS y RIMS	104
Figura 37. Conectividad tipo estrella de estaciones de referencia a estación maestra	109

Figura 38. Diseño 3D estación maestra y antena de enlace	110
Figura 39. Transmisión de datos desde la estación de referencia (RIMS) a la estación maestra	111
Figura 40. Diseño estación de enlace (antena parabólica)	112
Figura 41. Transmisión de datos ascendente desde la estación de enlace	112
Figura 42. Transmisión de datos descendente desde satélite órbita GEO	113
Figura 43. Transmisión de datos ascendente y descendente.	113

Índice de Tablas

Tabla 1. Rutas más concurridas de enero a junio de 2019	32
Tabla 2. 17 nuevas rutas aéreas internacionales desde Colombia. 2018	33
Tabla 3. Exactitud del servicio de posicionamiento estándar del sistema GNSS	43
Tabla 4. Ubicación de antenas de referencia del sistema GAGAN	58
Tabla 5. EGNOS Ranging and Integrity Monitoring Stations (RIMS)	61
Tabla 6. Rutas nacionales	66
Tabla 7. Rutas internacionales	67
Tabla 8. Servicios a la navegación disponibles	73
Tabla 9. Localización final antenas RIMS	82
Tabla 10. Inspección antena RIMS 1	83
Tabla 11. Inspección antena RIMS 4	84
Tabla 12. Inspección antena RIMS 3	85
Tabla 13. Inspección antena RIMS 5	86
Tabla 14. Inspección antena RIMS 7	87
Tabla 15. Inspección antena RIMS 10	88
Tabla 16. Zonas de cobertura SAM/CAR-COL	89
Tabla 17. Características de la ubicación de antenas RIMS	95
Tabla 18. Distancia entre estaciones de referencia y estación maestra	108
Tabla 19. Ítems fase 1	114
Tabla 20. Ítems fase 2	115
Tabla 21. Ítems fase 3	116
Tabla 22. Ítems fase 4	117
Tabla 23. Ítems fase 5	118

Índice de Gráficas

Gráfica 1. Pasajeros transportados nacional 2013-2018	31
Gráfica 2. Operaciones nacionales, regular y no regular	32
Gráfica 3. Operaciones internacionales regular y no regular	33
Gráfica 4. Progresión del ciclo solar	98

Abreviaturas

ABAS	<i>Aircraft Based Augmentation System</i>
ASQF	<i>Application Specific Qualification Facility</i>
CAR	Caribe
COCESNA	Corporación Centroamericana de Servicios de Navegación Aérea
DME	<i>Distance Measuring Equipment</i>
EGNOS	<i>European Geostationary Navigation Overlay Service</i>
FAA	<i>Federal Aviation Administration</i>
GAGAN	<i>GPS Aided Geo Augmented Navigation</i>
GBAS	<i>Ground Based Augmentation System</i>
GEO	<i>Geosynchronous Equatorial Orbit</i>
GLONASS	<i>Global Navigation Satellites System</i>
GNSS	<i>Global Navigation Satellite System</i>
GPS	<i>Global Positioning System</i>
IFR	<i>Instrumental Flight Rules</i>
ILS	<i>Instrument Landing System</i>
IONEX	<i>IONosphere Map Exchange Format</i>
ISRO	<i>Indian Space Research Organisation</i>
MCC	<i>Master Control Centre</i>
MEO	<i>Medium Earth Orbit</i>
MSAS	<i>Multi-functional Satellite Augmentation System</i>
NDB	<i>Non-Directional Beacon</i>
NLES	<i>Navigation Land Earth Station</i>
OACI	Organización de Aviación Civil Internacional
PACF	<i>Performance Assessment and Check-out Facility</i>

PNA COL	Plan de Navegación Aérea para Colombia
RIMS	<i>Ranging and Integrity Monitoring Stations</i>
RINEX	<i>Receiver Independent Exchange Format</i>
RNAV	<i>Area Navigation</i>
SACCSA	Sistema de Aumentación para el Caribe, Centro y Sur América
SAM	Sur America
SBAS	<i>Satellite Based Augmentation System</i>
SDCM	<i>System for Differential Corrections and Monitoring</i>
SNAS	<i>Satellite Navigation Augmentation System</i>
TEC	<i>Total Electron Content</i>
UAEAC	Unidad Administrativa Especial de Aeronáutica Civil
URSS	Unión de Repúblicas Socialistas Soviéticas
VHF	<i>Very High Frequency</i>
VMC	Condiciones Meteorológicas de Vuelo Visual
VOR	<i>VHF Omnidirectional Range</i>
WAAS	<i>Wide Area Augmentation System</i>

Propuesta De Emplazamiento Para La Implementación Del Segmento Terrestre De Un Sistema Tipo SBAS En El Territorio Colombiano

Resumen

SBAS es un Sistema de aumentación de señal satelital GNSS. El sistema consta de cuatro segmentos diferentes: tierra, espacio, usuario, y comunicación. El segmento tierra recibe las señales de posicionamiento de los satélites, y corrige el error que produce el paso de la señal por la capa atmosférica llamada ionosfera. Este error genera que la posición real de la aeronave tenga una diferencia de hasta 100 metros con la posición que calculan los satélites.

El segmento tierra está conformado por: estaciones de referencia, estación maestra y estación de enlace. La estación de referencia capta las señales directas de posicionamiento de los satélites, por medio de antenas RIMS, y transmite la señal a la estación maestra. La estación maestra calcula el error de posicionamiento y posteriormente envía la señal con la corrección a la estación de enlace. La estación de enlace envía la señal corregida a los satélites. Estos satélites envían la señal corregida a las aeronaves y a la estación de referencia, con la finalidad de monitorear la señal. Para 2019 existen sistemas SBAS implementados en: E.E.U.U (WAAS); Europa (EGNOS); India (GAGAN); Japón (MSAS). Para el estudio de implementación del segmento terrestre SBAS en Colombia primero se realizó un estudio de las necesidades del espacio aéreo monitoreando las rutas aéreas que sobrevuelan el país, lo que permitió determinar las aerovías más transcurridas, y se determinaron las ubicaciones del segmento terrestre SBAS. Se tomó como referencia el sistema GAGAN para hacer ingeniería inversa de la cobertura de señal y del emplazamiento de las estaciones de referencia, teniendo en cuenta las recomendaciones FAA.

Por último se generaron simulaciones para los diferentes segmentos. En el software libre Radio Mobile se simuló la cobertura de recepción de las estaciones de referencia, en software libre Orbitron se simuló la disponibilidad y cobertura de los satélites, en STK se simuló la recepción de señal de las antenas RIMS, y también se simuló la transmisión de señal de la estación de enlace al satélite y del satélite al usuario. Las simulaciones de cada segmento dieron cumplimiento a los objetivos propuestos.

Palabras clave: SBAS, RIMS, Satélite, GNSS.

Proposal for the Implementation of the Ground Segment of a SBAS Type System in the Colombian Territory

Abstract

SBAS is an augmentation signal for the satellite system GNSS type. The system is composed of four different segments: Ground, Space, Stakeholder and Communication Segments. The Ground segment receives the positioning signals by the atmosphere layer named ionosphere. This error generates that the aircraft real position has a difference up to 100 meters to the position that is calculated by the navigation satellites.

The Ground Segment is composed of: the reference stations, master station and the link station. The reference station intercepts the direct positioning signals of the communication satellites, by means of RMS antennas, hence, the signal to the master station is transmitted. The master station calculates the positioning error, furthermore it sends the signal along with the correction to the link station. The link station sends the positioning signal collected to the satellites of the space segment, these satellites direct the positioning signal to the aircrafts and to the reference station with the objective of monitoring the signal.

This project developed some simulations in different systems such as Orbitron, RadioMobile and STK. The analysis of the results of this simulation focused on the Colombian air operations were discussed along with the recommendations and conclusions obtained based on the Objectives established for the project.

Key words: SBAS, RIMS, Satellite, GNSS.

Capítulo 1

Introducción

El sector aeronáutico internacional está migrando a los Sistemas Globales de Navegación Satelital (GNSS) como medio de navegación debido a las ventajas de cobertura global. La utilización de GNSS en la aviación civil representa una oportunidad de hacer eficiente el uso del espacio aéreo, por lo que, los GNSS proporcionan servicio de posicionamiento geográfico empleando técnicas de medición de señales de radio emitidas desde satélites [1]. No obstante, estos sistemas no logran alcanzar los altos niveles o requerimientos de seguridad para la navegación que la Organización de Aviación Civil Internacional (OACI) define para las operaciones empleando navegación GNSS. Para poder cumplir estos requerimientos es necesario desarrollar sistemas de aumentación, los cuales monitorean y calculan las correcciones de las señales GNSS necesarias para obtener una mayor precisión, además de estudiar la fiabilidad y continuidad de las señales GNSS [2].

La característica principal de los sistemas de aumentación es la estructuración y/o arquitectura, tal que, la integridad del monitoreo de la señal GNSS recae en el emplazamiento del segmento terrestre, por lo tanto, las estaciones de referencia recopilan las señales emitidas por el segmento espacial GNSS, para, a partir de ahí, realizar comparación de estas señales y transmitir esta información a un centro de control, conocidas como, estación maestra. La estación maestra, calcula las correcciones además de, determinar los niveles de integridad, los cuales son emitidos a estaciones de enlace; encargadas de transmitir la señal a satélites geoestacionarios que, a su vez, emiten la señal a los usuarios.

Para analizar esta problemática es necesario analizar sus causas, los sistemas de aumentación, especialmente SBAS, se encargan de corregir los errores en la señal, debido a errores causados por la ionosfera, tal que, retardan la transmisión y recepción de las señales, por otro lado, el tipo de error causado por efemérides o reloj[1]. De acuerdo con lo anterior, la calidad de las correcciones y los niveles de integridad generados por SBAS,

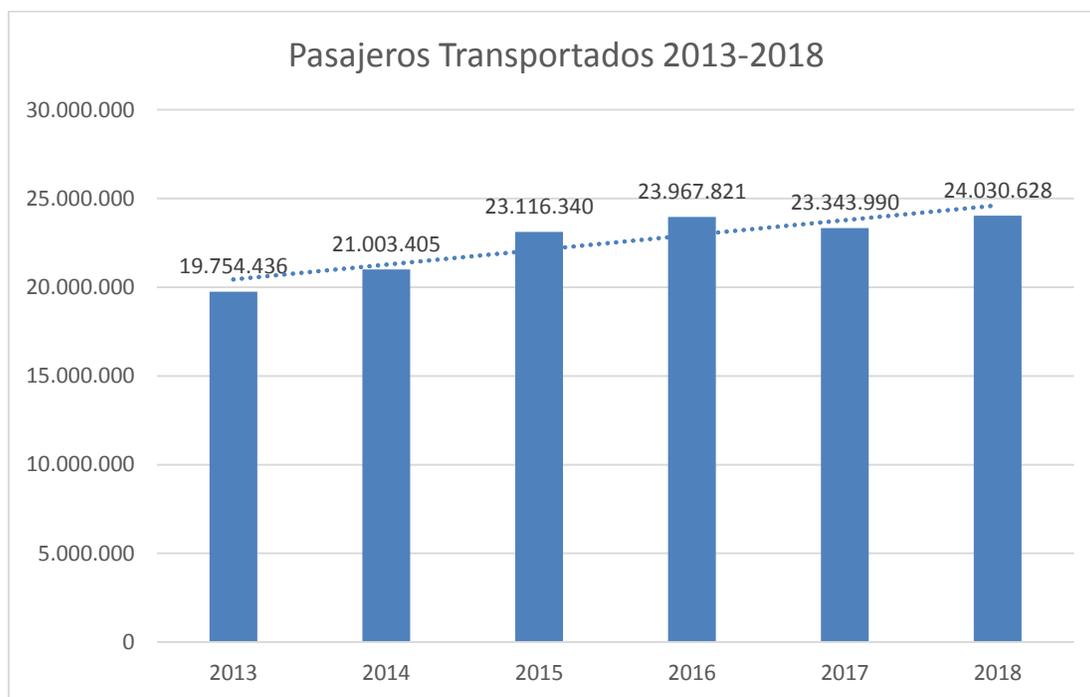
están relacionados con el emplazamiento o distribución, configuración y número de estaciones de referencia que componen a este. Este trabajo de grado presenta una propuesta de ubicación de la infraestructura que compone el segmento terrestre del SBAS en el territorio colombiano capaz de monitorear las señales GNSS.

Se presentan los resultados de un análisis realizado en el espacio aéreo colombiano, en el cual se estudiaron los vuelos nacionales e internacionales, con el interés de reconocer las zonas más transitadas, para, a partir de ahí, generar una propuesta de ubicación de las estaciones de referencia. Por lo anterior, se compararon con otros sistemas de aumentación SBAS implementados en el mundo. Por último, se presenta una simulación de radio del segmento terrestre para verificar la cobertura a toda Colombia.

Capítulo 2

Planteamiento del Problema

Las operaciones nacionales aéreas en Colombia han incrementado un 18% entre los años 2013 y 2018 [1]. Este incremento en las operaciones trae beneficios en la economía del país, según el portal web “portafolio.co” “En 10 años, Colombia duplicó su conexión aérea con el mundo” [4]. La Aeronáutica Civil Colombiana (UAEAC) mantiene en constante actualización las estadísticas de operaciones aéreas tanto regular como no regular de todas las conexiones nacionales e internacionales. En la Gráfica 1 se muestra la cantidad de pasajeros regular y no regular transportados a nivel nacional desde el año 2013 hasta el año 2018 [3].



Gráfica 1. Pasajeros transportados nacional 2013-2018, Boletines Operacionales UAEAC.

Fuente: Autores.

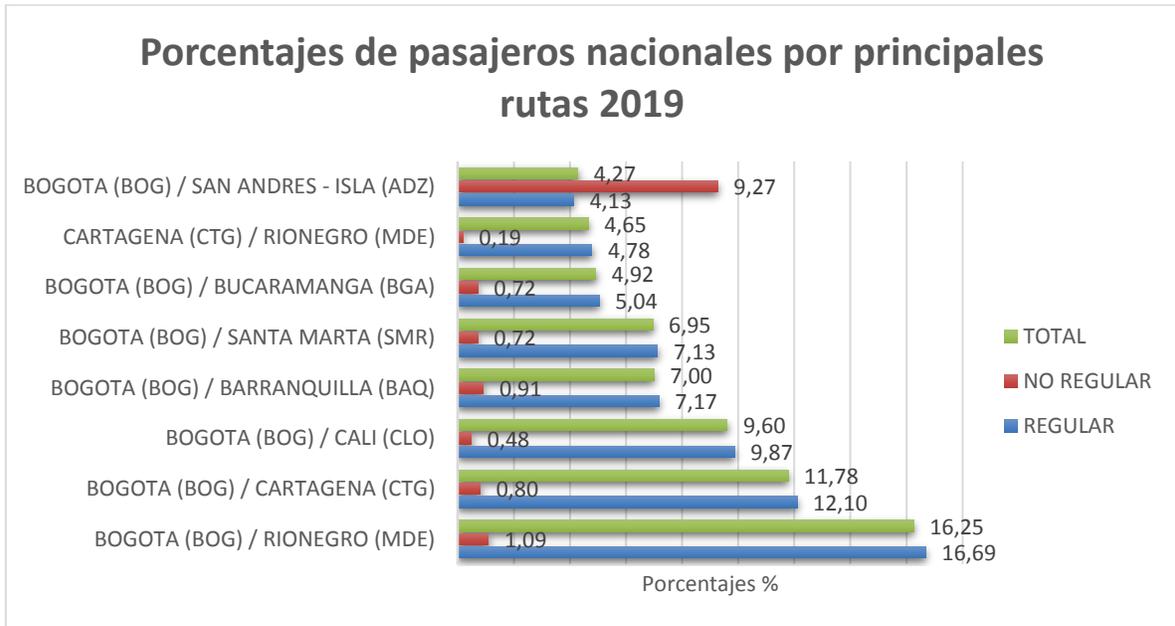
Entre los meses de enero a junio del 2019, ocho rutas aéreas representaron el 65% de las operaciones aéreas a destinos nacionales en Colombia como se muestra en la Tabla 1 [3].

ruta	Enero - Junio 2019					
	Regular	%	No Regular	%	Total	%
BOGOTA (BOG) / RIONEGRO (MDE)	1.669.416	16,69	3.144	1,09	1.672.560	16,25
BOGOTA (BOG) / CARTAGENA (CTG)	1.210.048	12,10	2.299	0,80	1.212.347	11,78
BOGOTA (BOG) / CALI (CLO)	987.069	9,87	1.384	0,48	988.453	9,60
BOGOTA (BOG) / BARRANQUILLA (BAQ)	717.778	7,17	2.622	0,91	720.400	7,00
BOGOTA (BOG) / SANTA MARTA (SMR)	713.256	7,13	2.060	0,72	715.316	6,95
BOGOTA (BOG) / BUCARAMANGA (BGA)	504.482	5,04	2.072	0,72	506.554	4,92
CARTAGENA (CTG) / RIONEGRO (MDE)	478.193	4,78	545	0,19	478.738	4,65
BOGOTA (BOG) / SAN ANDRES - ISLA (ADZ)	413.161	4,13	26.615	9,27	439.776	4,27
TOTAL	6.693.403	66,91	40.741	14,19	6.734.144	65,43

Tabla 1. Rutas más concurridas de enero a junio de 2019, Boletines Operacionales UAEAC.

Fuente: Autores.

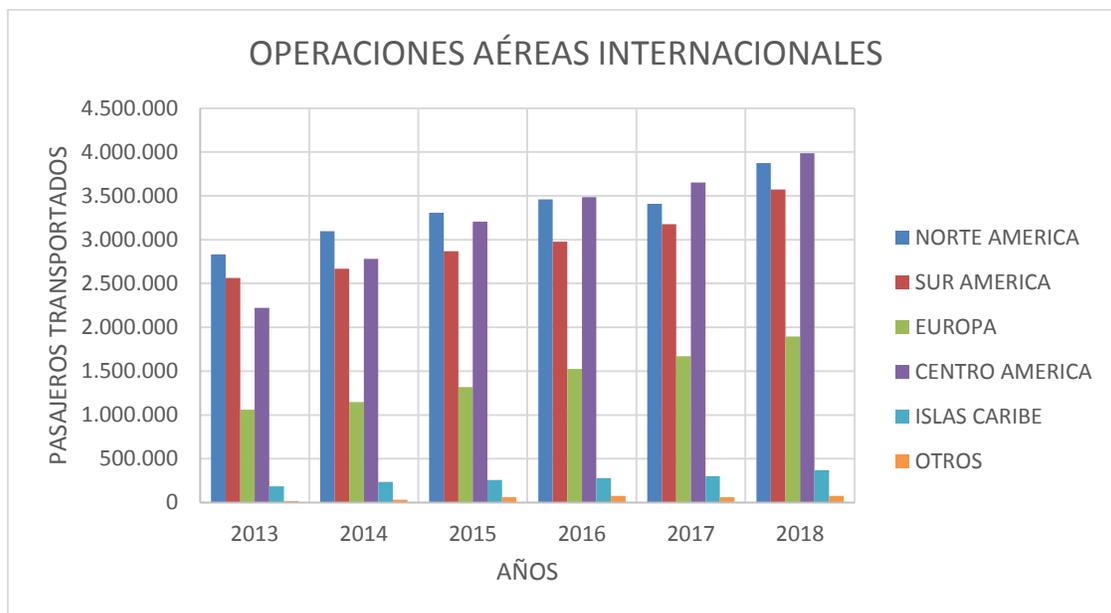
Las operaciones regulares son las más habituales, lo que significa que en Colombia se puede conocer de ante mano la congestión de las aerovías. En la Gráfica 2 se esquematizan las operaciones regulares y no regulares del 2019. [3]



Gráfica 2. Operaciones nacionales, regular y no regular, Boletines Operacionales UAEAC.

Fuente: Autores.

Las operaciones aéreas desde y hacia Bogotá D.C., son las de mayor demanda. El aeropuerto internacional ElDorado es el que maneja más operaciones de carga en Latinoamérica y el tercero en transporte de pasajeros. La ubicación geográfica del país es estratégica porque conecta el continente Americano. Por esta razón el espacio aéreo colombiano es importante en la región [5]. Las operaciones internacionales han aumentado en un 36% entre el 2013 y 2018. En la Gráfica 3 se evidencia el transporte de pasajeros por continentes [3].



Grafica 3. Operaciones internacionales regular y no regular.

Fuente: Boletines Operacionales UAEAC.

Por otro lado, ProColombia anunció por medio del periódico EL TIEMPO, la apertura de 17 nuevas rutas aéreas que empezaron a operar a finales del año 2018. En la tabla 2 se muestran las rutas aéreas con las aerolíneas operadoras. [6]

17 NUEVAS RUTAS AEREAS INTERNACIONALES DESDE COLOMBIA		
	RUTA	AEROLINEA
1	LIMA - MEDELLIN	LATAM
2	GUAYAQUIL - BOGOTA	TAME
3	QUITO - BOGOTA	TAME
4	SAN SALVADOR - CARTAGENA	AVIANCA
5	ORLANDO - BOGOTA	SPIRIT
6	ORLANDO - MEDELLIN	SPIRIT
7	ORLANDO - CARTAGENA	SPIRIT
8	LIMA - MEDELLIN	VIVA AIR PERU
9	LIMA - BOGOTA	VIVA AIR PERU
10	MUNICH - BOGOTA	AVIANCA
11	CHICAGO - BOGOTA	AVIANCA
12	SANTACRUZ DE LA SIERRA - BOGOTA	AVIANCA
13	CANCUN - MEDELLIN	AEROMEXICO
14	MIAMI - PEREIRA	AMERICAN AIRLINES
15	CARACAS - CALI	AVIOR AIRLINES
16	FORT LAUDERDALE - CALI	SPIRIT
17	MIAMI - SANTA MARTA	VIVA AIR

Tabla 2. 17 nuevas rutas aéreas internacionales desde Colombia. 2018, Boletines Operacionales UAEAC.

Fuente: Autores.

A su vez, La OACI (organización de aviación civil internacional), en vista del aumento progresivo que se presenta en el tráfico aéreo año tras año ha diseñado el plan mundial de

navegación aérea 2016-2030, con la visión de *“lograr el crecimiento sostenible del sistema mundial de aviación civil”*. En el apéndice 5, capítulo navegación, habla de la infraestructura de radio ayudas tierra-aire y plantea estrategias para solucionar el incremento de tráfico por medio de la migración a la navegación satelital. Una de las problemáticas que pretende solucionar la OACI es la diferencia de congestión de radio ayudas entre distintos territorios. Norte América y Europa son los territorios con mayor tráfico aéreo en el mundo lo que conlleva la necesidad de instalar más de radio ayudas en tierra, las cuales necesitan mantenimiento periódico y acarrea costos adicionales. Por esta razón han implementado alternativas de navegación satelital con el afán de solucionar la saturación de aerovías y al mismo tiempo reducir costos de navegación a largo plazo. [7]

Para el 2019, la navegación aérea por radioayudas en Colombia utiliza cuatro sistemas, estas son: VOR, DME, ILS y NDB; los cuales desde el 2002 a 2018 según el Plan de Navegación Aérea para Colombia o PNA COL de la UAEAC, en la sección navegación, comunica que actualmente se encuentran 51 sistemas VOR, 51 sistemas DME (51 asociados al VOR), 14 sistemas ILS con sus respectivos DME de baja potencia asociado, y 11 sistemas NDB [8]. Estos sistemas se deben someter a inspecciones, pruebas y ensayos en periodos contemplados en la resolución #2500 del 28 de junio de 2004 de la UAEAC para cada sistema, con el fin de garantizar su debido funcionamiento [9]. Cada sistema debe cumplir los siguientes periodos de ensayo:

- Sistemas VOR-DME serán inspeccionados cada 12 meses.
- Sistemas ILS serán inspeccionados cada seis meses.
- Sistemas NDB serán inspeccionados sean sus requerimientos operativos o técnicos [10].

El sistema de navegación VOR ostenta el mayor número de antenas instaladas en Colombia. En la Figura 1 se puede observar la distribución de radio ayudas en el territorio colombiano, donde se evidencian las zonas de mayor y menor densidad de antenas. Las zonas de menor densidad se deben al difícil acceso topográfico y por esta razón son zonas de menor navegación, lo que genera una congestión en las zonas de fácil acceso que generalmente son zonas con mayor población civil, y tomando en cuenta los incrementos progresivos en operaciones aérea en Colombia, para el 2030 existirá una congestión en las aerovías actuales.

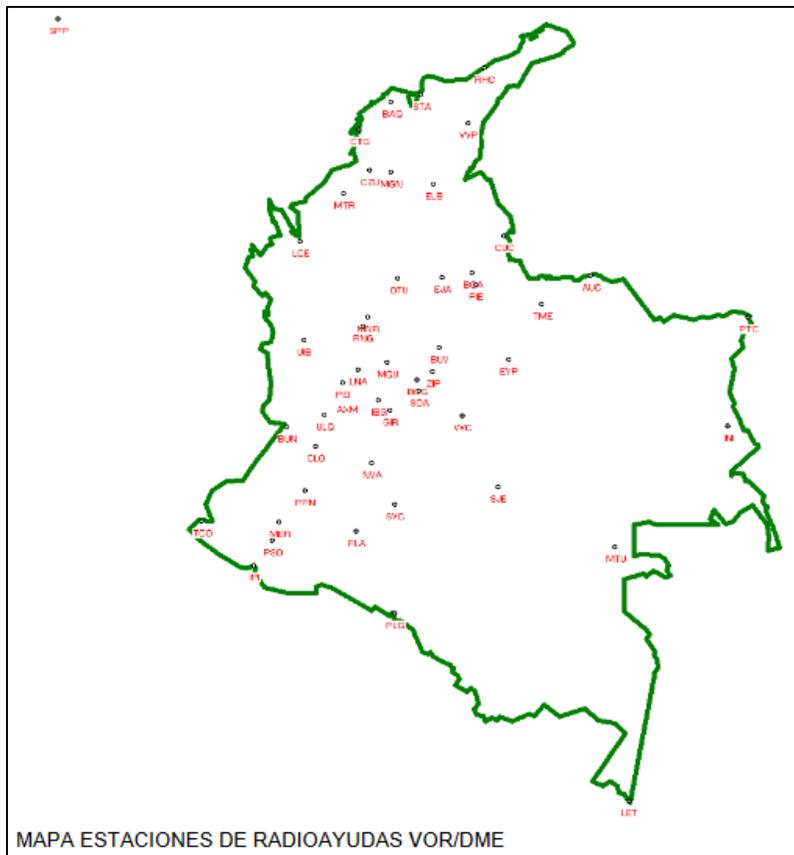


Figura 1, PNA COL VOL II, 2017, mapa de estaciones de VOR/DME, UAEAC.

Fuente: UAEAC

El plan de navegación aérea de Colombia PNA COL, en el volumen II sección estrategias tecnológicas, informa sobre los sistemas que se deben implementar a corto, mediano y largo plazo. Con respecto a la navegación satelital la UAEAC implementará sistemas GNSS en zonas carentes de radio ayudas convencionales. El sistema ABAS (*Aircraft Based Augmentation System*) aumenta las señales GNSS a bordo de la aeronave, este sistema hace parte del corto plazo del PNA COL. La primera fase finalizó en el año 2018, lo que significa que actualmente en Colombia las aeronaves operan con la capacidad de recibir las señales de aumentación satelital. GBAS (*Ground Based Augmentation System*), es un sistema GNSS usado en proximidad a pista (despegue/aterrizaje). Este sistema está en estudio de factibilidad en categoría I en aeropuertos de mayor demanda operacional siendo parte del mediano plazo el cual finalizará en el año 2026 [11]. Con base a lo anteriormente mencionado, en Colombia se quieren implementar dos de los tres sistemas GNSS. El sistema faltante SBAS (*Satellite Based Augmentation System*) es el sistema complementario para la fase de vuelo crucero y es el sistema que reemplazaría las radio ayudas tierra-aire

como lo son las 51 estaciones de VOR que actualmente están el territorio colombiano. Con base a la información mencionada se formula la siguiente pregunta: ¿De qué manera se podría implementar el segmento terrestre de un sistema de aumentación satelital de navegación tipo SBAS para dar cobertura al territorio colombiano?

2.1 Objetivos

2.1.1 Objetivo General

Realizar un estudio técnico para establecer la viabilidad del emplazamiento para la implementación del segmento terrestre del sistema SBAS como sistema primario en fase de vuelo crucero en el territorio colombiano.

2.1.2 Objetivos Específicos

- Identificar las necesidades de espacio de cobertura de las principales cinco rutas aéreas de Colombia.
- Determinar la cantidad de antenas necesarias (maestras y de referencia) para la implementación el sistema SBAS en el territorio colombiano
- Simular técnicamente la viabilidad de la cobertura de los territorios CAR/SAM propuesta con las antenas del sistema SBAS.

2.2 Justificación

El sector aeronáutico en Colombia tiene un papel muy importante en el desarrollo del país, por lo que, es necesario implementar sistemas que garanticen la navegación de manera eficiente y segura en todas las fases de vuelo. Los sistemas de navegación y posicionamiento por satélite representan el avance tecnológico más importante en navegación, vigilancia y gestión del tránsito aéreo [12]; convirtiéndose en una poderosa herramienta para la utilización en la UAEAC. Desde principios de los años 90 se han desarrollado constantemente mejoras aplicadas a los sistemas globales de navegación satelital o sistemas GNSS. Por mencionar una mejora, el sistema GPS se declaró como plenamente operativo en el año 2000 cuando eliminó la disponibilidad selectiva, lo que permitió notablemente la expansión en diferentes campos de aplicación de estos sistemas al mejorar la precisión considerablemente [12].

Por lo anterior, los sistemas GNSS permiten a los usuarios determinar la posición en cualquier lugar con receptores sencillos. No obstante, existen aplicaciones que requieren mayor precisión, siendo la aviación civil uno de los casos representativos, donde la seguridad es un aspecto crítico y se requieren altos niveles de precisión, integridad y una disponibilidad continuada del sistema. Los sistemas GNSS hasta el 2019, no son suficientes por sí solos para ser utilizados como sistemas de navegación por no cumplir los requisitos impuestos, citados anteriormente, por la OACI en el sector de la aviación, principalmente.

Asimismo, los sistemas de aumentación son desarrollados para garantizar y suplir los requerimientos establecidos por la OACI. Estos sistemas permiten mejorar las prestaciones de los sistemas GNSS, ya que proporcionan a los receptores GPS información adicional para que estos mejoren el cálculo de la posición. La información proporcionada a los receptores GPS puede ser desde datos sobre las fuentes de error de la señal, retardo ionosférico, derivas en los relojes atómicos a bordo de los satélites o errores en las efemérides, hasta el estado de la propia señal [13].

Dicho lo anterior, el sistema de aumentación tipo SBAS es una parte integral del esfuerzo

mundial para reducir la dependencia a la infraestructura en tierra y aprovechar la precisión proporcionada por las tecnologías satelitales; sin mencionar que este sistema es el más extendido para la aviación civil. Para la aplicación de dicho sistema, se requiere instalar una infraestructura compuesta por estaciones de referencia, estaciones de enlace, y una estación maestra encargadas de calcular y monitorear continuamente el estado de operación de los sistemas GNSS. Por medio de esta infraestructura se tendrá la capacidad de realizar correcciones de posicionamiento y emitirlas para que las aeronaves las apliquen en sus fases de operación. Por lo tanto, es necesario ubicar de manera estratégica las estaciones de referencia en el territorio colombiano, así como la cantidad requerida de estaciones de enlace para realizar la tarea de monitoreo y emisión de las correcciones de las señales GNSS.

Conforme al aumento de la implementación de sistemas SBAS en la aviación civil, se quiere implementar este sistema en Colombia dadas sus ventajas y beneficios que traería en la transición a nuevas tecnologías e infraestructura de sistemas de navegación satelital, además de, proporcionar señales de rango adicionales para mejorar la disponibilidad y la transmisión de datos de integridad a los receptores GPS a bordo de las aeronaves. Con el interés de hacer una idea del porqué implementar el SBAS permitirá establecer y consolidar un equilibrio dentro del ritmo de crecimiento del sector aeronáutico a corto, mediano y largo plazo en Colombia.

Esta iniciativa permitirá a la UAEAC contemplar la implementación del SBAS como medida para suplir los requerimientos establecidos por la OACI para cada una de las fases de vuelo, especialmente en fase crucero. Asimismo, reducir la dependencia a la infraestructura terrestre de las radioayudas convencionales implementadas a la fecha en Colombia. Este sistema permitirá a la UAEAC mudarse a la navegación satelital, tal que, pueda ser considerada como navegación primaria. De la misma forma, la implementación de estas nuevas tecnologías en Colombia permitirá mejorar la rentabilidad de las aerolíneas nacionales e internacionales, debido a la disminución de las horas de vuelo de sus aeronaves y, por ende, la reducción de costos sea en combustible, mantenimiento, etc. convirtiendo el sector aeronáutico colombiano más atractivo, situando a Colombia como en

un país pionero en el desarrollo de estas nuevas tecnologías en Latinoamérica.

Por último, el interés en la aplicación de este tipo de proyectos se debe ver como una oportunidad de incentivar y fomentar a las nuevas generaciones en el estudio de estas nuevas tecnologías, aumentando el número de investigaciones y proyectos dentro de las universidades colombianas y especialmente, animar a los estudiantes de la Fundación Universitaria Los Libertadores a que conozcan y desarrollen estos sistemas de aumentación y navegación satelital.

2.3 Metodología

El enfoque investigativo de este trabajo de grado pretende situar a las personas en un contexto en el que observen, perciban, aprendan y actúen; por lo que, la investigación aplicada o practica fue la metodología adoptada para el desarrollo del trabajo; tal que, la investigación aplicada se caracteriza por resolver o mejorar una situación específica o particular, para comprobar un método o modelo mediante la aplicación innovadora y creativa de una propuesta de intervención [14]. Por otra parte, se trabaja un estudio exploratorio que permite examinar un tema poco estudiado o novedoso [15], con el interés de obtener y recopilar información de sistemas de aumentación implementados a la fecha para construir una idea de la arquitectura terrestre del sistema de aumentación SBAS.

2.3.1 Diseño metodológico

El diseño metodológico utilizado en la concepción del trabajo es presentado a continuación:
Etapa 1: Fundamentación teórica de los conceptos de sistemas de navegación y sistemas de aumentación.

Etapa 2: Revisión de las referencias bibliográficas, enfocándose en procesos de implementación de sistemas SBAS en el mundo.

Etapa 4: Desarrollo de un modelo que permita determinar el posicionamiento de las estaciones terrenas, estaciones de enlace y estación Maestra en Colombia.

Etapa 5: Simulación de la cobertura propuesta respecto al número de estaciones ubicadas en Colombia.

Etapa 6. Discusión de los resultados obtenidos con respecto a los sistemas de aumentación SBAS implementados a la fecha.

Página dejada en blanco intencionalmente.

Capítulo 3

Marco Teórico

3.1 Navegación Aérea

La navegación aérea es sistema para determinar la posición de una aeronave por medio de métodos determinados e instrumentación abordo y en tierra con el fin de trazar una trayectoria que debe pasar por puntos determinado o *waypoint* para definir una ruta de vuelo [16]. Existen cuatro métodos de navegación aérea, que son:

- Navegación observada: Este tipo de navegación es utilizada en condiciones de visibilidad del piloto VMC (condiciones meteorológicas de vuelo visual), se determina la ubicación de vuelo por medio de los accidentes naturales o artificiales, como lo pueden ser las montañas, faros, ríos, construcciones en tierra, entre otros.
- Navegación a la estima: Se determina la posición por medio del conocimiento de la trayectoria descrita, la velocidad desarrollada, y el tiempo transcurrido desde la última posición conocida. Este tipo de navegación tiene inconveniente debido a que las condiciones de vuelo pueden cambiar durante la trayectoria de un punto conocido a otro.
- Navegación astronómica: Se determina la posición por medio de observación de los astros, valiéndose del sextante, del cronometro y del almanaque. Su uso se ha limitado a vuelos transoceánicos y vuelos en los casquetes polares.
- Navegación por radio – radionavegación: Es el sistema las utilizado actualmente, donde la posición de la aeronave se determina por equipos radioeléctricos a bordo de la aeronave y equipos en tierra que emiten señales con la información necesaria para determinar la posición y el mejor rumbo de vuelo.

3.2 Navegación Por Radio

La navegación por radio es la más usada en todo el mundo. Se basa en una red de antenas terrestres que deben seguir las aeronaves durante la ruta de vuelo. Estas antenas se les conocen como radio ayudas y generan un barrido de interrogación a unas diferentes frecuencias dependiendo del tipo de ayuda y su función. Las radio ayudas en fase crucero son las siguientes.

VOR (*VHF Omnidirectional Range*): es un sistema de navegación de corto / medio alcance operando en el rango 108-117.95 MHz de frecuencias [17].

DME (*Distance Measuring Equipment*): La ayuda de navegación DME contiene un transpondedor (receptor y transmisor). El equipo de la aeronave irradia pulsos de energía a la ayuda de navegación DME; las señales secundarias se transmiten de vuelta a la aeronave. Un interrogador a bordo mide el tiempo necesario para que las señales se transmitan y reciban en la aeronave [17].

3.3 Concepto GNSS

El sistema GNSS (Global Navigation Satellite System) es un sistema que proporciona cobertura de posicionamiento global. Este sistema abarca todas las constelaciones de satélites existentes como GPS, GALILEO, GLONAS, y los sistemas complementarios de las señales satelitales como son las estaciones en tierra de monitoreo satelital y los sistemas de aumentación de señales satelitales [22]. Los sistemas GNSS se componen de 3 segmentos diferentes: segmento espacio, segmento tierra y/o de control y segmento usuario.

3.3.1. Limitaciones del GNSS

El sistema GNSS presenta limitaciones en el desempeño para uso en aviación civil con respecto a los requerimientos de la OACI. Estas limitaciones se presentan en tres tipos: exactitud, disponibilidad e integridad. De estos 3 tipos el que mayor presenta error es la exactitud. En la Tabla 3 se muestra el error de exactitud generado por el sistema GNSS [19].

errores	Promedio mundial 95% del tiempo	Peor ubicación 95% del tiempo
error de posición horizontal GPS	13 metros	36 metros
error de posición vertical GPS	22 metros	77 metros
error de posición horizontal GLONASS	19 metros	44 metros
error de posición vertical GLONASS	29 metros	93 metros

Tabla 3. Exactitud del servicio de posicionamiento estándar del sistema GNSS. [19]

3.4 Constelación De Satélites

3.4.1 GLONASS

El sistema GLONASS (*Global Navigation Satélites System*) fue desarrollado por la extinta Unión Soviética URSS. Fue diseñado con fines militares, con un subconjunto para aplicaciones civiles. Cuenta con una constelación de 24 satélites, pero actualmente se encuentran en funcionamiento 14. Los satélites se distribuyen en 3 planos orbitales inclinados 64.8° a 19100 km de altitud y un periodo de 11 horas y 15 minutos. Actualmente la responsabilidad del sistema GLONASS es de la Federación Rusa [19].

3.4.2 GALILEO

GALILEO es el sistema de navegación satelital europeo, proporciona servicios de posicionamiento global y se encuentra bajo control civil.

El sistema está conformado de 24 satélites posicionados en tres planos circulares de órbita terrestre media (NEO) a 23.222 km de altitud y con una inclinación de los planos orbitales de 56 grados a la línea Ecuatorial.

El sistema inicial entró en servicio el 15 de diciembre del 2016. se estima que se puedan

disponer de nuevos servicios para el año 2020 [20].

3.4.3 GPS

GPS es un sistema de localización, para proporcionar estimaciones precisas de posición, velocidad y tiempo. Diseñado por el departamento de defensa de los Estados Unidos con fines militares; operativo desde 1995 utiliza una constelación de satélites alrededor de 24 para determinar por triangulación, latitud, longitud y altitud de objetos que se encuentren en la superficie terrestre.

El sistema GPS (*Global Position System*) está conformado de 3 segmentos básicos, espacio, control y usuario. El segmento básico es responsabilidad militar y consta de 24 satélites GPS con órbitas geoestacionarias de 26560 km y un periodo de 12 horas. El segmento de control al igual que el segmento básico es responsabilidad militar y este consta de 5 estaciones monitoras encargadas de mantener en órbita y supervisar el correcto funcionamiento de los satélites, tres antenas en tierra que envían señales a los satélites que deben transmitir y una estación de supervisión de las operaciones. El segmento usuario, está formado por las antenas y receptores pasivos terrestres. A partir de los mensajes que emite cada satélite visible, calculan distancia y estimas de posición y tiempo.

El objetivo del GPS es calcular posición en 3 puntos coordenados (x,y,z), los cálculos de las distancias parten del punto a 3 satélites como mínimo. La distancia entre el receptor y el satélite se mide multiplicando el tiempo de vuelo de la señal emitida desde el satélite por su velocidad de propagación. El tiempo de vuelo de la señal de radio requiere de una sincronización de los relojes de los satélites y los receptores, para que generen el mismo código simultáneamente. La pseudodistancias es el error de precisión que se genera por la desincronización de los relojes de los receptores, los relojes de los satélites son muy precisos.

3.5 Fuentes De Error De Los GPS

Las velocidades de las señales de radio son modificadas por las partículas cargadas

eléctricamente de las cuales está conformada la ionosfera, a este fenómeno se le denomina perturbación ionosfera.

Los fenómenos meteorológicos hacen que las señales electromagnéticas disminuyan su velocidad. Los errores que genera este fenómeno se asemejan a los generados por la ionosfera, pero su corrección es casi imposible.

Los relojes atómicos de los satélites presentan pequeñas desviaciones; así mismo los relojes del receptor presentan una desviación a mayor medida.

Las señales transmitidas desde los satélites pueden sufrir reflexiones antes de alcanzar el reflector. Los receptores modernos emplean técnicas de proceso de señal y antenas de diseño especial para minimizar el error, que es difícil de modelar por la topografía del entorno donde se ubica la antena GPS. [21]

Los receptores deben considerar la receptor-satélite visibles utilizada en el cálculo de distancias, ya que una determinada configuración espacial puede aumentar o disminuir la precisión de las medidas. Los receptores utilizan un factor multiplicativo que modifica el error de medición de la distancia.

3.6 Ionosfera Terrestre

La ionosfera es la sección de la atmósfera comprendida entre los 60-2000 km de altitud, donde la radiación solar ioniza los átomos, permitiendo la existencia de carga libre.

La ionosfera es cambiante y la densidad de estas cargas libres depende de la latitud, la hora, estación del año y el ciclo solar. Estos factores pueden ser medibles y estudiados para posteriormente predecir su comportamiento.

Las señales que emiten los satélites GNSS se distorsionan por causa de la absorción/remisión de las cargas libres. Estas cargas aceleran el campo eléctrico y magnético de la señal, lo que produce un adelanto/retraso de la señal que recibe el usuario, es decir la ionosfera actúa como un medio de dispersivo. La dispersión tiene un índice de refracción, que depende de la frecuencia, generando diferencias de medición entre la señal satelital de fase (L) y de código (P) [22].

3.7 Sistemas De Aumentación

A causa de los errores que sufre la señal del satélites existen sistemas de aumentación satelital que su función es corregir las señales que llegan al usuario [22]. Para la aviación esta corrección se genera en 3 sistemas diferentes:

3.7.1. ABAS (*Aircraft Based Augmentation System*):

Se emplean 4 satélites para calcular la posición y poder determinar fallos en el envío de la información. El ABAS consta de dos sistemas:

- Sistemas monitor de integridad autónoma del receptor (RAIM): detecta fallos calculando su posición con la combinación de 4 satélites sobre 5 o 6 visibles, para saber que satélite emite señal defectuosa. La aeronave también puede actuar como satélite debido a su altura ya que conoce su posición.
- Sistema de identificación y exclusión de fallas (FDE): permite descartar la señal del satélite defectuoso para seguir el GNSS de forma normal. Este sistema se encuentra en las aeronaves que operan actualmente.

3.7.2. GBAS (*Ground Based Augmentation System*):

Este Sistema está diseñado para ayuda en el tráfico aéreo en distancias cortas en aproximación a los aeropuertos. Este sistema no depende de los satélites GEO, por lo que a diferencia del SBAS no está diseñado para dar cobertura a amplias regiones geográficas.

GBAS tiene la función de vigilar la señal satelital en un aeropuerto y transmite correcciones diferenciales de distancia, mensajes de integridad locales y datos de aproximación directamente al receptor de a bordo mediante una radiodifusión de datos VHF (VDB).

3.7.3. SBAS (*Satellite Based Augmentation System*):

Es un sistema de corrección de las señales GNSS que se transmiten al receptor generando una cobertura global de señal aumentada. Está basada en una red de estaciones terrestres intercomunicadas que procesan las señales satelitales y corrigen el error de la señal satelital durante el paso por la ionosfera [22].

3.8 ¿Qué es SBAS?

Los sistemas de aumentación basados en satélites (SBAS) son una parte integral del esfuerzo mundial para reducir la dependencia de la infraestructura en tierra y aprovechar la precisión proporcionada por las tecnologías de satélites.

Un SBAS consiste en una red de estaciones de referencia terrestre inspeccionadas con precisión, ampliamente dispersas para recibir y procesar señales de satélites. Las estaciones terrestres de referencia envían datos de satélites a las estaciones principales, que luego determinan la integridad, las correcciones diferenciales, los errores residuales y la información ionosfera de cada satélite vigilado y generan parámetros de navegación por satélites de la órbita geoestacionaria (GEO). Esta estación se envía a una estación terrestre (GES) y se conecta con el mensaje de navegación GEO a los satélites GEO. Los satélites GEO transmiten integridad, datos de corrección y señales de alcance a receptores GPS/SBAS de todo el mundo. En conjunto, las estaciones de referencia terrestres, las señales basadas en satélites y los sistemas de sensores de aeronaves conforman la arquitectura SBAS-navegación de aeronaves.

Se han ejecutado varios programas regionales del SBAS, cada uno de ellos cumple una norma mundial común. Por lo tanto, todos son compatibles e interoperables y no interfieren entre sí. Un operador con un receptor SBAS puede beneficiarse del mismo nivel de servicio y rendimiento sin importar el área de cobertura en la que se encuentre.

3.8.1. Sistemas SBAS operativos:

- WASS (Wide Area Augmentation System), comisionado en julio de 2003, en Estados Unidos.

- MSAS (Multi-functional Satellite Augmentation System) de Japón, comisionado en 2007.
- EGNOS (European Geostationary Navigation Overlay Service) de EUROPA, comisionado en marzo de 2011,
- GAGAN (GPS Aided Geo Augmented Navigation) de India, comisionado recientemente en 2013-2014. [16][17]

Además de lo anterior, se encuentran en fase de implementación el sistema de Rusia conocido como SDCM (*System for Differential Corrections and Monitoring*), y el sistema chino, SNAS (*Satellite Navigation Augmentation System*).

Como información adicional, hay estudios de factibilidad de la implementación de un sistema de aumentación por parte de un grupo llamado SACCSA (Sistema de aumentación para el caribe y sur América), actualmente se encuentra en fase III este proyecto el cual es coordinado por la OACI. La Figura 2 muestra las zonas de cobertura implementadas.



Figura 2, *Operating in Satellite-Based Augmentation System (SBAS) Airspace, 2013, what is SBAS?*

3.9 Beneficios de SBAS

El objetivo principal de la creación del SBAS es aumentar la seguridad de la aviación. Al mejorar la precisión, integridad, fiabilidad y disponibilidad del GPS, SBAS aumenta la capacidad de navegación de todas las clases de aeronaves en todas las fases del vuelo.

Debido a la mayor integridad de la posición de navegación GPS, los sistemas capaces de SBAS se clasifican como equipos de navegación primaria.

Precisión: la precisión es la diferencia entre la posición real de la aeronave y la posición proporcionada por el equipo a bordo. Al proporcionar al usuario correcciones a la órbita del satélite y errores de reloj, así como el error residual de la ionosfera, un SBAS garantiza el cumplimiento de los requisitos de exactitud.

Integridad: la integridad del sistema se refiere a la capacidad de proporcionar avisos oportunos a los usuarios cuando el sistema produce información engañosa y no debe utilizarse como único medio de navegación. Esta capacidad de auto detectar errores de posición del sistema, permite que la tripulación de vuelo sea notificada oportunamente del error, al igual que una banda de radio de navegación VHF.

Fiabilidad: la fiabilidad es la continuidad de la función para el sistema y se define como la probabilidad de que la precisión y los requisitos de integridad serán soportados por el sistema a través de la operación de vuelo.

Disponibilidad: la disponibilidad es la probabilidad de que las funciones de navegación y detección de fallos sean operativas y cumplan los requisitos de precisión, integridad y continuidad. [23]

3.10 Arquitectura SBAS

El Sistema SBAS se compone de 4 segmentos:

- Segmento espacial
- Segmento de soporte
- Segmento usuario
- Segmento tierra

En la Figura 3 se esquematiza la arquitectura del sistema SBAS.

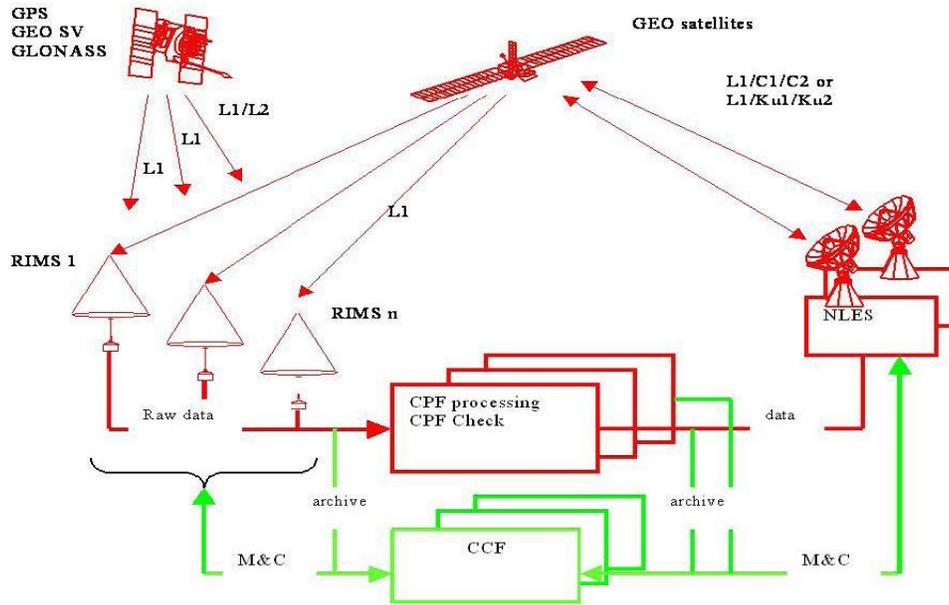


Figura 3, Egnos service provision, 2017, Egnos.

3.10.1. Segmento espacial

El segmento espacial SBAS está compuesto por varios satélites geostacionarios encargados de transmitir la señal de los mensajes SBAS. Los satélites SBAS son satélites multipropósito, encargados de transmitir una señal similar a la señal GPS que transmite a los usuarios el mensaje de navegación generado en tierra.

La carga útil de navegación SBAS GEO es un transponder que permite la señal generada en tierra por una frecuencia en banda C, a una señal transmitida en la banda de frecuencia L. la banda C mejora el ajuste de retraso de la señal producida por la atmosfera (incluye el error ionosferico) [9].

La carga útil de navegación SBAS incluye funciones avanzadas como:

- Aumento del ancho de banda de emisión y potencia de transmisión.
- Evolución a los transpondedores de doble frecuencia L1/L5.
- Evolución de la carga útil de los transpondedores de la señal a las cargas regenerativas en las que la señal se acumula por completo a bordo.

3.10.2. Segmento de soporte

El segmento de soporte comprende todos los elementos necesarios para el correcto funcionamiento del SBAS: control de configuración, evaluación del rendimiento, mantenimiento y desarrollo, servicio de asistencia, etc. [24].

3.10.3. Segmento usuario

El segmento usuario se compone de todos los equipos necesarios para recibir la señal y usar la información SBAS. En navegación aérea son las aeronaves con SBAS funcional [24].

3.10.4. Segmento tierra

El segmento en tierra genera y vincula la señal de aumento que transmitirá el segmento espacial. Para el cumplimiento de la misión, el segmento terrestre se divide en cuatro subsistemas [24].

- Estaciones de monitoreo: se encarga de recibir las señales satelitales y enviar los datos a estaciones maestras para el procesamiento.
- Estaciones maestras: se encarga de procesar los datos que envían las estaciones maestras, y generar mensajes que se transmiten a los satélites.
- Centro de control de satélites: se encarga de generar la señal con el mensaje proporcionado por el centro de procesamiento y vincularlo a los satélites.
- Capa de comunicación: interconecta los diferentes elementos del segmento en tierra.

3.11. Red de estaciones de monitoreo

La red de estaciones de monitoreo están diseñadas para monitorear los satélites y la ionosfera con la precisión y disponibilidad requerida en el área de cobertura SBAS. Este monitoreo requiere una densidad de antenas dispuestas en el área de cobertura requerida [24]. Las estaciones de monitoreo tiene las siguientes características:

- Receptores de doble frecuencia (L1/L2) con calidad geodésica.
- Frecuencia atómica estándar (cesio / rubidio / H-Maser).
- Capaz de rastrear todos los satélites GPS y GEO a la vista.
- Asignadas en ubicaciones con buenas condiciones en términos de interferencia de múltiples rutas y radiofrecuencias.
- Georeferencia a WGS-84 (o ITRF) con una precisión de 1-3cm.
- Cumplir con las siguientes capacidades de referencia:
 - Adquisición de datos de 1Hz.
 - Controles de calidad de datos integrados para eliminar datos engañosos.
 - Procesamiento y difusión de datos en pocos milisegundos.
 - Robustez integrada contra amenazas conocidas (detección de ondas malignas, entre otras).

3.11.1. Estaciones maestras o centro de procesamiento

El centro de procesamiento es uno de los elementos críticos del sistema SBAS, ya que se encarga de generar la información de aumento para el usuario. El centro de procesamiento se encarga de las siguientes funciones:

- Procesar todos los datos que se transmiten desde las estaciones maestras.
- Estimar las correcciones de las señales satelitales, los errores producidos por la ionosfera y los términos de varianza de error.
- Realiza evaluaciones de integridad
- Genera el formato de salida para las señales de acuerdo a los estándares SBAS.

3.11.2. Centro de control de satélites

La función del centro de control de los satélites es transmitir los mensajes SBAS procesados por la estación maestra a los satélites GEO [24]. Sus funciones son:

- Codificar las señales tipo GPS con la codificación PRN.
- Modular la información del mensaje SBAS.
- Sincronizar el tiempo de la señal con el tiempo de referencia SBAS.

- Controlar la sincronización de tiempo entre la portadora y los componentes del código de la señal de enlace ascendente.
- Cierre de bucle de control de la estación de enlace ascendentes GEO-satélite recibiendo y procesando las señales de satélites SBAS de enlace descendente.

3.11.3. Capa de comunicación

La capa de comunicación garantiza que todos los elementos del segmento de tierra SBAS estén interconectados en tiempo real. Esta conexión debe realizarse con estándares de alto rendimiento en términos de línea confiable, como la fibra óptica [24].

3.12. Antenas Del Segmento Tierra

Cada subsistema del segmento tierra necesita antenas determinadas para el cumplimiento, las antenas necesarias son las siguientes:

3.12.1. Antenas del subsistema de monitoreo

Los receptores de señal satelital usadas en las estaciones de monitoreo son antenas RIMS (*Ranging and Integrity Monitoring Stations*). Existen tres tipos de antenas A, B y C. su función es enviar los datos a las estaciones maestras. En la Figura 4 se muestran los 3 tipos de antenas RIMS [25].

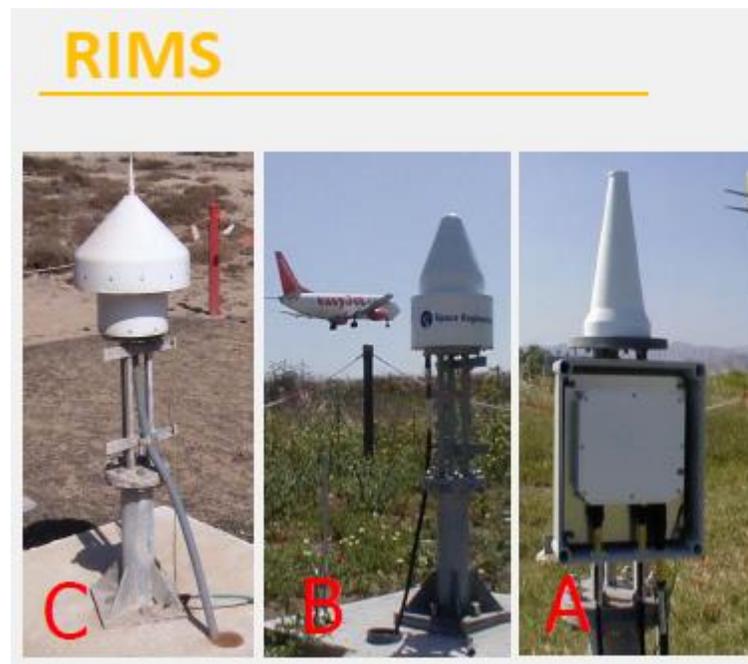


Figura 4, Egnos Service Provision, 2017, RIMS. [25]

Las antenas RIMS no producen interferencia con las señales emitidas por las radio ayudas a la navegación como los VOR y DME o las ayudas de aproximación ILS, MLS entre otras ayudas. En las Figuras 5 y 6 se detalla la ubicación cerca de pista de las antenas RIMS.



Figura 5, Feasibility Study and Site Choice for an EGNOS Station in Algeria, 2015, RIMS. [25]



Figura 6, Feasibility Study and Site Choice for an EGNOS Station in Algeria, 2015, RIMS. [25]

3.12.2. Estaciones maestras o centros de procesamientos

Las estaciones maestras monitorean y controlan todos los segmentos en tierra y realiza todos los archivos de datos que entran al sistema [25]. En la Figura 7 se muestra el compone de instalación central de procesamiento CPFPS.



Figura 7, Understanding GPS: principles and applications, 2006, Processing Facility Center. [25]

3.12.3. Centro de control de satélites

Selecciona el mejor mensaje procesado por la estación de monitoreo y lo envía a los satélites SBAS [25]. En la Figura 8 se muestra la antena parabólica de enlace a los satélites SBAS.



Figura 8, Egnos Service Provision, 2017, RIMS.

Capítulo 4

Estado del Arte

4.1. Sistema GAGAN

GAGAN es el sistema de navegación asistida por GPS desarrollado por la agencia espacial de la India ISRO (*Indian Space Research Organisation*), con el fin de desplegar y certificar un sistema de aumentación tipos SBAS que cubra el espacio aéreo del subcontinente indio [26]. La función de GAGAN es proporcionar una señal de navegación para aviación civil, y este sistema cumple con todos los niveles de seguridad exigidos por la OACI de un sistema de aumentación GNSS. El sistema GAGAN proporciona un servicio de aproximación con una precisión de 1/10 millas náuticas (rendimiento de navegación requerido o RNP-0.1) sobre el espacio aéreo indio [26].

El sistema es interoperable con otros sistemas SBAS como los implementados regionalmente como son: WAS de E.E.U.U, EGNOS de Europa, MSAS de Japón.

Los elementos del sistema GAGAN son los siguientes:

Estaciones de referencia india (INRES): son 15 estaciones de referencia en todo el país y su función es recopilar datos de medición de los satélites GPS y GEO que estén a la vista, esta información se envía a las estaciones INMCC que son el centro de control de datos y corrección de errores. Las ubicaciones de las estaciones de referencia son las siguientes (Tabla 4):

ESTACIONES DE MONITOREO		
1	AHMEDABAD	23 10 48 N 072 34 48 E
2	BANGALORE	12 58 12 N 077 35 53 E
3	BHUBANESWAR	20 15 52 N 085 49 41 E
4	KOLKATA	22 32 28 N 088 20 16 E
5	DELHI	28 40 00 N 077 13 00 E
6	DIBRUGARH	27 29 00 N 095 00 00 E
7	GAYA	24 75 00 N 085 01 00 E
8	GOA	15 24 07 N 074 02 36 E
9	GUWAHATI	26 10 00 N 091 46 00 E
10	JAISALMER	26 55 00 N 070 55 00 E
11	JAMMU	32 44 00 N 074 51 00 E
12	NAGPUR	21 09 14 N 079 04 59 E
13	PORBANDAR	21 38 33 N 069 36 17 E
14	PORTBLAIR	11 40 00 N 092 45 00 E
15	TRIVANDRUM	08 30 00 N 076 53 59 E

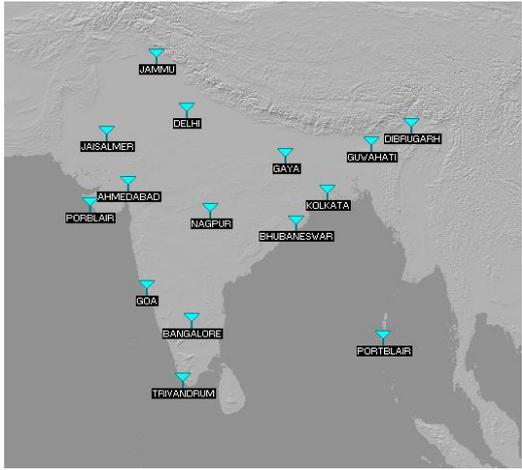


Tabla 4. Ubicación de antenas de referencia del sistema GAGAN.

Fuente: Autores

- Centro de control maestro de la india (INMCC): los datos recopilados por las INRES se envían la maestra para procesarlos. La estación maestra envía datos procesados con los parámetros de corrección e integridad en forma de mensaje SBAS, a las estaciones de enlace para enviar a los satélites visibles.
- Estación de enlace ascendente de la india INLUS: recibe los códigos de señal de INMCC con el mensaje SBAS, esta estación codifica el mensaje para que pueda ser leído por el satélite y envía el mensaje a los satélites. Esta estación cuenta con un monitoreo de señal de usuario, lo que significa que también recibe la señal del satélite con el mensaje SBAS de la misma manera que recibe el mensaje la aeronave. Este monitoreo se hace con el fin de saber si la fiabilidad de la corrección de exactitud del mensaje SBAS [27]. En la figura 9 se muestra el enlace completo de toda cobertura y comunicación de todo el sistema GAGAN.

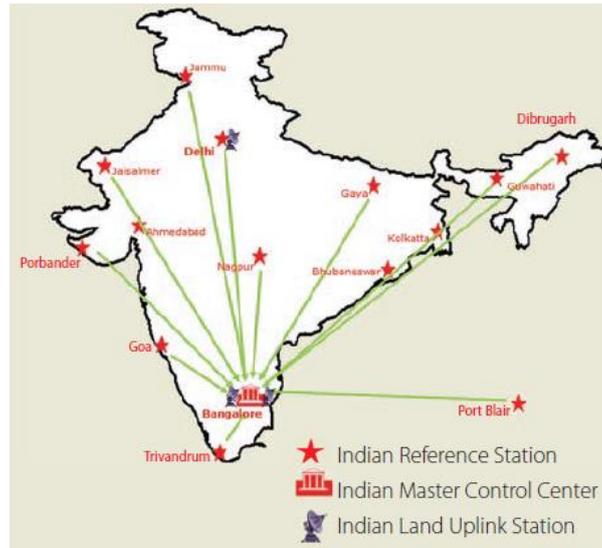


figura 9, India's Satellite-Based Augmentation System GAGAN — Redefining Navigation over the Indian Region, 2016, stations.[27]

4.2. Sistema EGNOS

EGNOS es el sistema de aumentación basado en satélites de Europa. Este sistema funciona exactamente igual a los demás sistemas de aumentación implementados en el mundo como WAAS y GAGAN. La particularidad de EGNOS es la cobertura, y debido a que este sistema es de control civil, Europa intenta anexar la cobertura del sistema a otros territorios como es el norte de África, partes de Asia, el hemisferio norte que conecta los países nórdicos con Canadá, e incluso ha experimentado con antenas en Latinoamérica, con la finalidad de captar señales EGNOS en esta región, lo que no fue satisfactorio. Pese a los resultados de captación de señales EGNOS en Latinoamérica, España colaboró y dirigió parte del estudio de un sistema de aumentación de señales satelitales en sur América, centro América y el caribe [28]. Este sistema fue bautizado con el nombre SACCSA (Sistema de aumentación para el caribe y sur América).

Existen 34 estaciones de monitoreo con antenas RIMS del sistema EGNOS, las antenas RIMS comprenderán de dos a tres canales independientes llamados “A/B” o “A/B/C” dependiendo de si el canal C está instalado o no. Los canales A/B constituyen las cadenas de medición, una alineación del centro de procesamiento de datos maestro del sistema, con datos brutos para el cálculo de las correcciones diferenciales, la otra cadena de control de EGNOS es para fines de comparación y monitoreo de integridad. Para evitar fallas comunes, los canales A/B están

diversificados y están contruidos por diferentes fabricantes. Cada uno de estos canales A y B constituyen una cadena de medición independiente con su propia antena y su propio receptor [29]. En la Tabla 5 se muestran las ubicaciones de las antenas, las clases de antenas y los canales de las RIMS.

- RIMS (*Ranging and Integrity Monitoring Station*): Estación de monitoreo de rango e integridad.
- MCC (Master Control Centre): Centro de control maestro.
NLES (*Navigation Land Earth Station*): Estación terrestre de navegación.
- PACF (Performance Assessment and Check-out Facility): Instalación de evaluación y salida de desempeño.
- ASQF (*Application Specific Qualification Facility*): Centro de solicitud específica de estudio.

PAÍS	CIUDAD	ANTENAS	CLASE DE RIMS
FRANCIA	TOULOUSE	PACF	
	AUSSAGUEL	RIMS	A B C
	PARIS	RIMS	A
	KOUROU	RIMS	A B
ALEMANIA	LANGEN	MCC	
	BERLIN	RIMS	A B C
	RAISTING	NLES	
ESPAÑA	TORREJON	MCC, NLES, ASQF	
	ISLAS CANARIAS	RIMS	A B C
	MALAGA	RIMS	A B
	PALMA DE MALLORCA	RIMS	A B
	SANTIAGO DE COMPOSTELA	RIMS	A B
REINO UNIDO	GLASGOW	RIMS	A B C
	GATWICK	RIMS	A B C
	GOONHILLY	NLES	
ITALIA	FUCINO	2 NNLES	RIMS
	CATANIA	RIMS	A B C
	CIAMPINO	MCC	A B
PORTUGAL	ISLAS AZORES	RIMS	A B C
	LISBOA	RIMS	A B C
	MADEIRA	RIMS	A B
	SINTRA	NLES	
SUIZA	ZURICH	RIMS	A B
NORUEGA	TRONDHEIM	RIMS	A B
	TROMSO	RIMS	A B C
ISLANDIA	REYKJAVIK	RIMS	A B
DINAMARCA	ALBORG	RIMS	A B
	ISLAS FAEROES	RIMS	A B C
SUECIA	GAVLE	RIMS	A B C
IRLANDA	CORK	RIMS	A B C
POLONIA	WARSAW OR CRACOVIA	RIMS	A B
BULGARIA	SOFIA	RIMS	A B C
FEDERACION RUSA	MURMANSK	RIMS	A B
	SANPETESBURGO	RIMS	A B C
TURQUIA	KONYA	RIMS	A B
TÚNEZ	DJERBA	RIMS	A B C
EGIPTO	MERSA MATROUH	RIMS	A B
ISRAEL	TEL AVIV	RIMS	A B
SUDAFRICA	HARTEBEEESHOCK	RIMS	A B
SINGAPUR O JAPON	SINGAPUR O NAHA	RIMS	A B
CANADA	OTTAWA	RIMS	A B

Tabla 5, EGNOS Raining and Integrity Monitoring Stations (RIMS), 2000, EGNOS Ground Segment Sites.

4.3. Sistema SACCSA

SACCSA es un Proyecto de la OACI con el objetivo de estudiar la mejora del entorno de navegación aérea en las regiones CAR / SAM con una solución SBAS. El proyecto fue fundado por los países participantes/estados miembros: Argentina, Bolivia, Colombia, Costa Rica, Guatemala, Panamá, España, Venezuela y COCESNA (Corporación Centroamericana de Servicios de Navegación Aérea) [30]. Para la fase II del proyecto, OACI elaboró un plan regional denominado RLA/03/902 “*ensayos SBAS/EGNOS en la región CAR/SAM*”, con la finalidad de evaluar las prestaciones y la viabilidad de los sistemas por medio del programa EDISA de la comisión europea [3]. La infraestructura de ensayo de la fase II, se basó en la instalación de antenas que pudieran recibir mensajes EGNOS, se ubicaron tres estaciones:

- Bogotá, Colombia
- Tegucigalpa, Honduras (representando cobertura COCESNA)
- La Habana, Cuba

La información se enviaba al satélite HISPASAT que servía de enlace para enviar la información a Madrid, de Madrid se enviaba la información a la estación maestra ESTB en Honefoss-Noruega y a la estación terrena de Toulouse-Francia. La señal corregida se enviaba al satélite INMARSAT AOR-E para distribución a los usuarios [28].

La fase II fue el referente para determinar la topografía de la red de estaciones de referencia, para la fase III. Se optimizó la red, con el análisis de segmentos de baja cobertura, lo que resultó en la eliminación de las estaciones externas de Madrid, Cabo Verde y Seattle. Estas estaciones se trasladaron dentro del área de cobertura necesaria [31]. En la Figura 10 se ilustran las estaciones de referencia usadas en la fase III para cobertura de la región SAM/CAR, esta imagen fue tomada del boletín N°3 del proyecto RLA/03/902.



Figura 10, Configuración de estaciones de referencia, Boletín N°3 RLA/03/902 SACCSA. 2010. [31]

En la séptima reunión del proyecto RLA/03/902 de la fase III-A, se difundió la primera señal SBAS-SACCSA transmitida en modo de prueba. Se usó el centro de procesamiento SBAS, magicSBAS de la empresa GMV, la cual procesó los datos GPS que recolectaron las estaciones de referencia. Los datos procesados se enviaron al satélite geostacionario Inmarsat 3F-4, por medio de la estación de enlace terrena de comunicación ubicada en Fucino, Italia, de la empresa INMARSAT. Los datos de cobertura del proyecto SACCSA se mostraron en un enlace en vivo desde las instalaciones de GMV en España [31]. Los mejores y peores resultados obtenidos en la prueba se ilustran en las Figuras 11 y 12, tomadas del boletín N°3 del proyecto RLA/03/902 del estudio SACCSA.

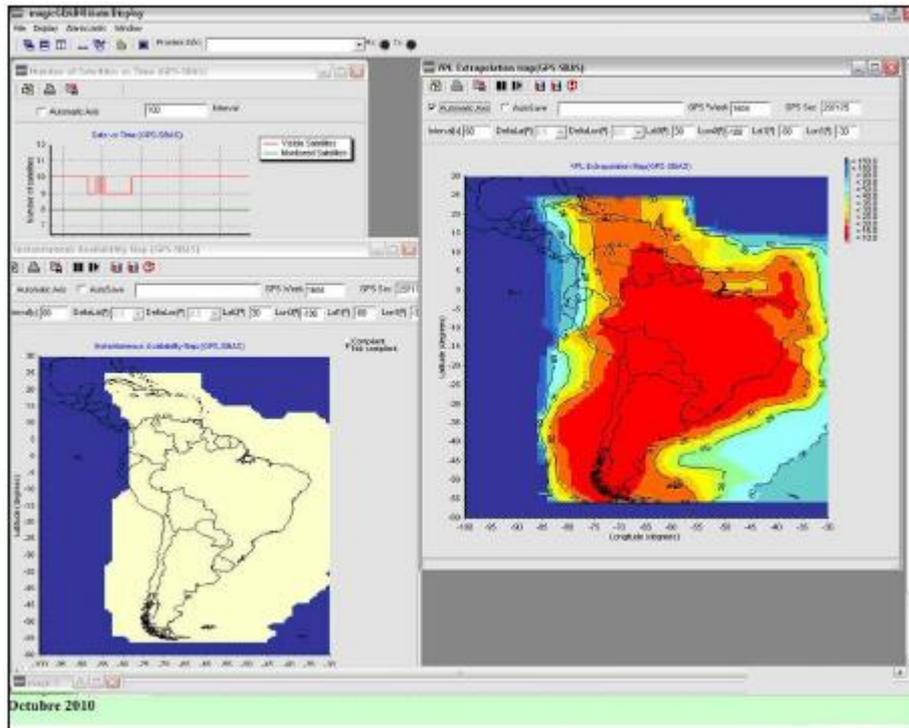


Figura 11, Mejores resultados observados en las pruebas, Boletín N°3 RLA/03/902 SACCSA, 2010. [31]

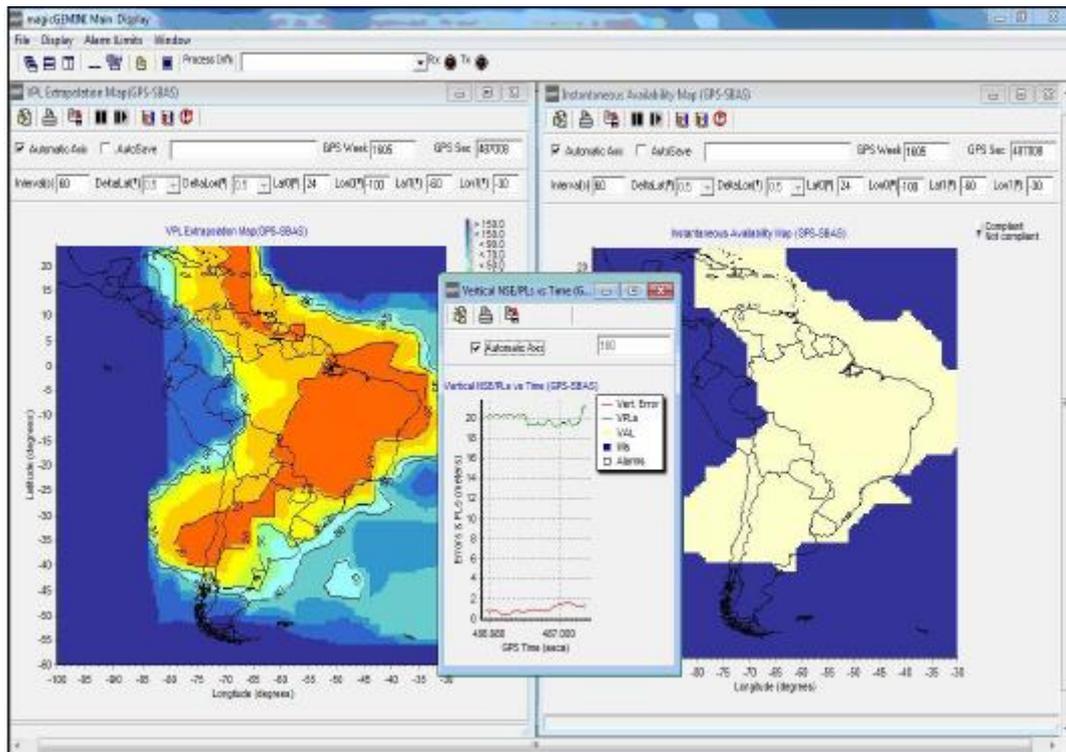


Figura 12, Peores resultados observados en las pruebas, Boletín N°3 RLA/03/902 SACCSA, 2010. [31]

Capítulo 5

Propuesta de emplazamiento para la implementación del Sistema SBAS en Colombia

5.1.FASE I: Criterios Para Identificar Estratégicamente Las Zonas Aéreas Más Transitadas Dentro Del Territorio Colombiano

Las operaciones aéreas tanto en Colombia como en el mundo están en constante crecimiento debido al alto nivel que demanda el transporte de pasajeros y carga, como se mencionó anteriormente en el Capítulo 2. Con el interés de conocer las zonas aéreas más transitadas en Colombia, se estableció un modelo que permitiera reconocer aspectos generales de los vuelos nacionales e internacionales, tal que, se obtuviera un aproximado de la ruta transitada por cada vuelo, la velocidad, altitud, entre otros.

Para conocer cada uno de los aspectos requeridos se empleó la página web Flightradar24¹. Esta página en su versión libre muestra información en tiempo real sobre el tráfico aéreo en el mundo, debido a que recibe los datos del vuelo directamente de los aviones. En ella se puede determinar origen/destino del vuelo, velocidad, altitud y lo más importante, conocer la posición de la aeronave en tiempo real tanto en coordenadas geodésicas (latitud/longitud) como en un renderizado que ilustra la ruta que lleva la aeronave; en la cual flightradar24 identifica cada fase de vuelo por colores (color morado - fase crucero), como se puede apreciar en la Figura 13.

¹ Disponible en: <https://www.flightradar24.com/>

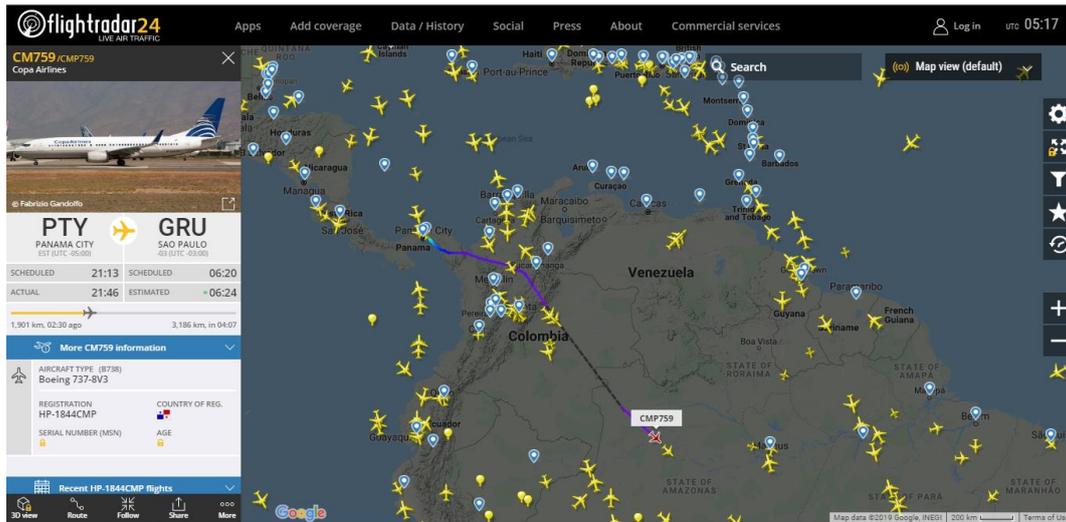


Figura 13. Vuelo internacional que pasa por Colombia.

Fuente: flightradar24

Con respecto a las principales rutas nacionales e internacionales que fueron identificadas a través de las estadísticas publicadas por la UAEAC en primera instancia, se realizó el seguimiento de estas en tiempo real por medio de Flightradar24 durante tres semanas. (FECHA) Recopilando la suficiente información que permitiera establecer un posible plan de vuelo para cada una de las rutas. Para ello, se tomó nota de sus coordenadas (latitud y longitud) punto a punto, especialmente en fase crucero; además de la velocidad, altitud y tipo de aeronave.

Por consiguiente, para garantizar la trazabilidad de los datos, primero se organizaron en tablas de Excel, luego se segregó la información tal que, cada tipo de vuelo se reconocerá por un número y letra; los vuelos nacionales se identificarán por la letra R (mayúscula) y los internacionales con la letra I (mayúscula) respectivamente. Además de identificar los aeropuertos de origen y destino por su sigla OACI. Por lo anterior, en la Tabla 6 y 7 se pueden apreciar las 31 rutas que se les hicieron seguimiento.

ID	Origen (sigla OACI)	Destino (Sigla OACI)
1R	SKBO	SKSM
2R	SKBO	SKCL
3R	SKCL	SKBO
4R	SKBO	SKCO
5R	SKBO	SKRG
6R	SKBO	CKCG
7R	SKBO	SKBQ
8R	SKBO	SKBG
9R	SKBO	SKSP

Tabla 6. Rutas nacionales. Fuente: autores.

Asimismo, uno de los factores que favorecieron esta intervención, fue identificar otras importantes rutas internacionales que sobrevuelan a Colombia. En la Tabla 2 se muestran tanto las rutas seleccionadas en primera instancia como las rutas que fueron identificadas en medio del seguimiento.

ID	Origen (sigla OACI)	Destino (Sigla OACI)
1I	SKBO	KLAX
2I	SKBO	KJFK
3I	SPJC	MDPC
4I	SLVR	MPTO
5I	SBGL	MPTO
6I	SPJC	SKBO
7I	SPJC	SKCG
8I	SKBO	KFLL
9I	SKBO	MMUN
10I	EHAM	SPJC
11I	SKSP	SKBO
12I	MMMX	SKBO
13I	SKBO	LEMD
14I	KMIA	SPJC
15I	MPTO	SAEZ
16I	SKBO	KMIA
17I	SKRG	KMIA
18I	LEMD	SKBO
19I	MMMX	SKBO
20I	SEGU	SKBO
21I	SBEG	SKBO
22I	SUMU	MPTO

Tabla 7. Rutas internacionales.

Fuente: autores.

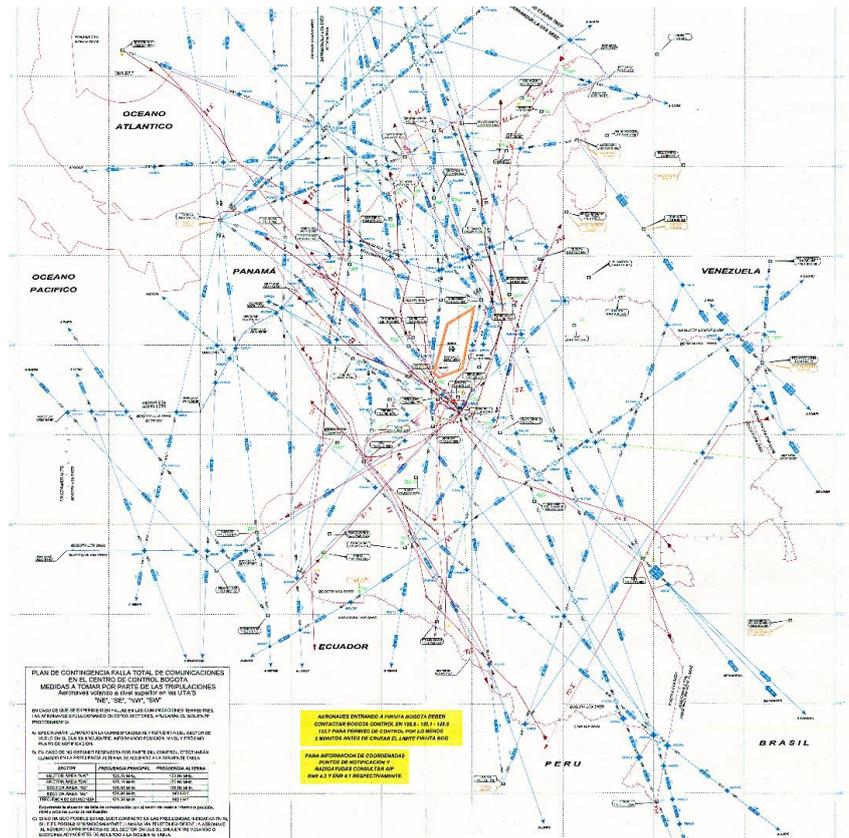
5.1.1. Carta De Navegación – Datos Experimentales

Con la carta de navegación RNAV5. UAEAC/OACI, se trazaron las coordenadas del plan de vuelo para cada una de las rutas a las que se le hizo seguimiento. Por medio de un método práctico se identificaron las radioayudas, los aeropuertos y puntos de notificación de paso u obligatorios, que se encuentran cerca de la ruta proyectada con respecto a los datos de coordenadas obtenidos en Fliht radar24. Por lo tanto, este consistió en plotear la carta de navegación RNAV5 publicado por la UAEAC, para posteriormente trazar a mano coordinada a coordinada en la carta de navegación, para determinar la trayectoria de cada una de las 31 rutas aéreas que sobrevuelan el espacio aéreo colombiano.

Al analizar el trazo de las 31 rutas, se identificaron los siguientes cuatro parámetros:

- 1 Puntos de alta demanda de sobrevuelo, ejemplo: triangulación de VOR (Bucaramanga, Barrancabermeja, Piedecuesta). Esta triangulación de radioayudas, conecta el tráfico aéreo desde Bogotá con el norte del país (vuelos nacionales) y el norte de América y Europa (para vuelos internacionales).
- 2 Zonas de espacio aéreo restringido como la zona de defensa militar, base área palanqueros.
- 3 Diferente trayectoria en las rutas aéreas de mismo punto origen-destino, como ejemplo: Bogotá-Ciudad de México (Avianca y Aeroméxico). Bogotá-Madrid (Avianca-Iberia). Estas rutas aéreas tienen el mismo origen y destino, pero entran al territorio colombiano usando diferentes zonas de radioayudas.
- 4 Importancia del territorio colombiano como zona de paso aérea. Las radioayudas de Colombia son importantes para los vuelos procedentes del sur del continente y que tienen como destino en centro de América, el norte de América, y para algunos países es necesario usar a Colombia como punto de paso para llegar a Europa.

El Anexo 1 contiene las rutas aéreas evaluadas en esta fase 1 de obtención de datos experimentales. En el Anexo 1 se puede observar las rutas trazadas RNAV en color azul. Estas se usaron como guía de trayectoria para encontrar los *Waypoint* de Colombia. En color rojo se trazaron las trayectorias de las rutas aéreas identificadas en sobrevuelos en Colombia. Estas trayectorias se usaron como guía primaria para determinar las zonas de mayores aerovías, y la infraestructura principal donde se podrían emplazar las estaciones de referencia.



Anexo 1. Plóter escaneado con las 31 rutas evaluadas.

Fuente: autores.

5.1.2. Planes De Vuelo Teóricos

Con el interés de corroborar los resultados de las trayectorias determinadas experimentalmente, se utilizó el programa web *SkyVector*² para realizar teóricamente los planes de vuelo de las 31 rutas evaluadas. Esta página en su versión libre permite realizar planes de vuelo contemplando los parámetros que exige la normatividad aeronáutica, tales como: identificación de la aeronave, reglas de vuelo (VFR- IFR) y tipo de vuelo (nivel inferior o superior), origen – destino del vuelo, velocidad, entre otros. Catalogando a está páginas web entre las más utilizadas en el sector aeronáutico para gestionar planes de vuelo.

El desarrollo de los planes de vuelo teóricos, se hicieron basados en los principios de navegación aérea por radioayudas y RNAV, con la finalidad de comparar los datos de coordenadas de las 31 rutas aéreas reales, con los planes de vuelo respecto a los servicios a la navegación.

²Disponible en www.skyvector.com

La diferencia entre el plan de vuelo teórico y la ruta real que toma la aeronave es la distancia donde la frecuencia emitida por la radioayuda es percibida por la aeronave. Esto se produce por el radio de cobertura de onda que genera las radioayudas. Pero en términos generales las aeronaves siguen el plan de vuelo estipulado en tierra, no hacen grandes variaciones en su trayectoria.

Cada aerolínea planifica las rutas para sus aeronaves tomando en cuenta la disponibilidad de paso por ciertos territorios. Esta disponibilidad está dada por diversos factores como lo pueden ser:

- El cumplimiento de los requerimientos establecidos por la OACI en la zona de paso;
- Discrepancias geopolíticas entre los operadores y el territorio a sobrevolar;
- El costo de servicios a la navegación.

Estos tres factores podrían explicar la diferencia entre las trayectorias de rutas aéreas con el mismo origen-destino, como los casos identificados en el parámetro 3. (Carta de navegación – datos experimentales).

En la Figura 14 se esquematizan las 31 rutas aéreas analizadas teóricamente en SkyVector en la fase 1.

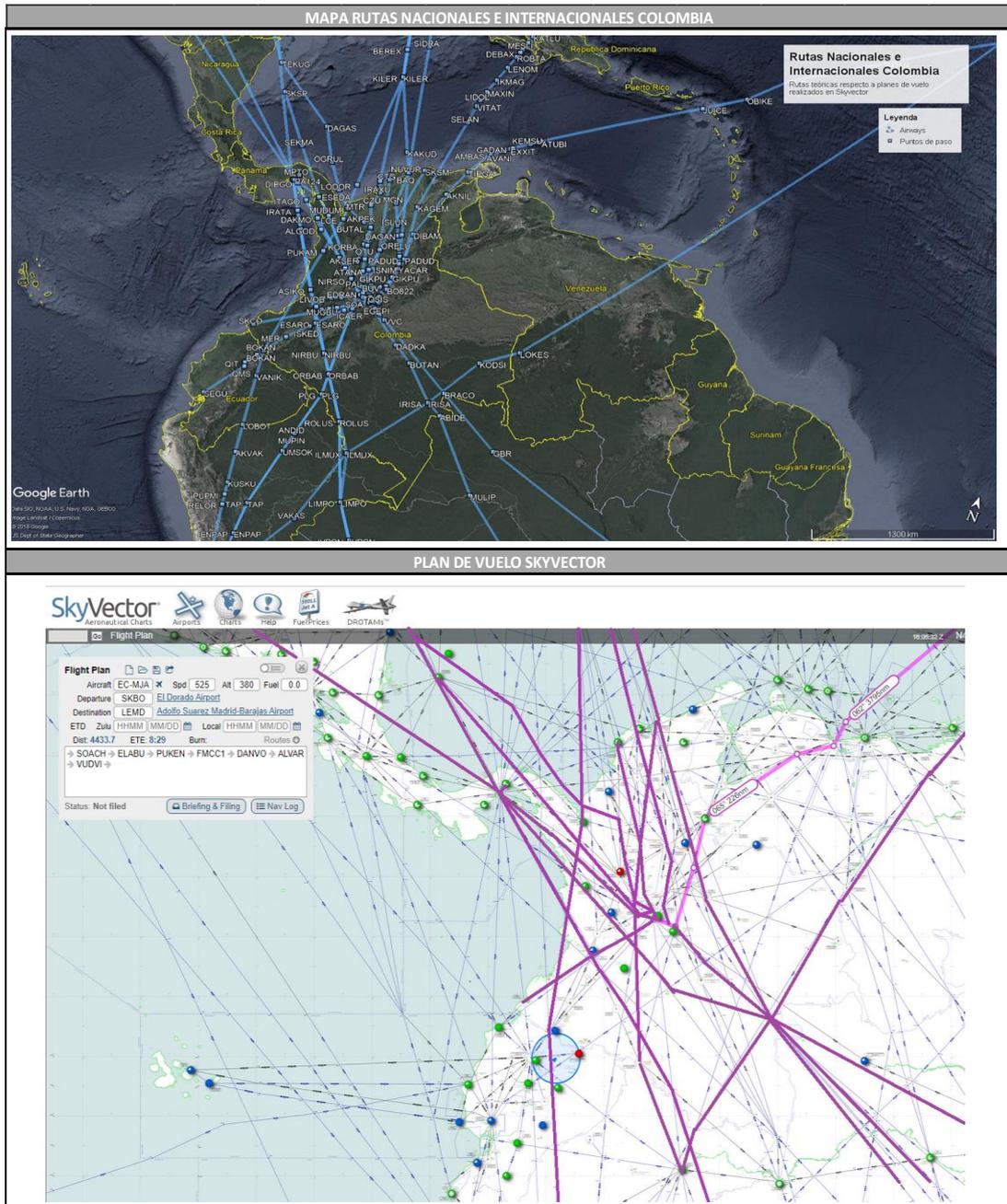


Figura 14. Esquemática teórica de las 31 rutas aéreas evaluadas, SkyVector.

Fuente: Autor

5.2.FASE 2: Criterios Para El Emplazamiento De Las Estaciones De Referencia

Existen recomendaciones para ubicar y/o posicionar estratégicamente las estaciones de referencia, las cuales surgieron a partir de la implementación de sistemas de aumentación realizados en diferentes regiones del planeta [32]. Algunas de estas recomendaciones fueron realizadas por organismos como son la Agencia Federal de Aviación (FAA), OACI y por los desarrolladores del sistema de aumentación de la india (GAGAN), las cuales se describirán a continuación:

- Las estaciones de referencia deben estar por lo menos a 500 kilómetros alejadas una de las otras.
- Las estaciones se deben ubicarse cerca de los límites de las áreas terminales.
- Se deben ubicar estaciones de referencia en las ciudades que cuenten con aeropuertos, principalmente en aquellos de carácter internacional.
- En regiones donde exista una forma irregular del terreno las estaciones de referencia deben ubicarse más cerca una de las otras.
- Aumentar el número de estaciones de referencia y ubicarlas estratégicamente para disminuir el efecto de arqueamiento.

Para la propuesta de implementación del segmento terrestre más específicamente las estaciones de referencia o antenas RIMS y maestra dentro del territorio colombiano se tomaron en consideración estas recomendaciones.

5.2.1.Propuesta de ubicación de las estaciones de referencia y maestra preliminar

El estudio de la implementación del segmento terrestre SBAS en Colombia ha seguido una serie de etapas para determinar las zonas aéreas más transitadas dentro del territorio colombiano. Asimismo, se definieron una serie de posibles puntos y/o ubicaciones en donde se emplazarían las estaciones de referencia y estación maestra respectivamente, tal que, como resultado del análisis del tráfico aéreo en Colombia realizado anteriormente, se establecieron 10 puntos los cuales están ubicados estratégicamente en Colombia. Estos fueron determinados a través de hacer una

triangulación de datos, lo cual permite definir los servicios a la navegación que se encuentran disponibles dentro de estas zonas de análisis. El resultado de este análisis se muestra en la Tabla 8 en donde se aprecian las radioayudas VOR y los puntos de notificación de paso u obligatorios que están dentro o cerca de los 10 puntos propuestos.

POSIBLE UBICACIÓN DE LAS ESTACIONES EN COLOMBIA (ANTENAS RIMS)			
RI MS	VOR	PUNTOS DE NOTIFICACIÓN-PASO	PUNTOS DE NOTIFICACIÓN- OBLIGATORIO
1	RIOHACHA / CERREJÓN	N/A	N/A
2	CARTAGENA / BARRANQUILLA	LOLUD	N/A
3	CAREPA	N/A	ARORO / KUBEK
4	SAN ANDRÉS	N/A	N/A
5	PIEDRECUESTA / BARRANCABERM EJA / BUCARAMANGA	N/A	PADUD
6	BOGOTÁ (ESTACIÓN MAESTRA)		
7	CALI	N/A	ESARO
8	PASTO	N/A	BOKAN
9	PTO. LEGUIZAMO	ORBAB	N/A
10	MITU	N/A	N/A

Tabla 8. Servicios a la navegación disponibles.

Fuente: autores.

De igual importancia, por medio de Google maps se renderizó la propuesta de ubicación de las estaciones, con el interés de conocer gráficamente el posicionamiento preliminar de las estaciones e informar la ciudad, aeropuerto (AP) y razón por la cual se emplazaría la estación en esta zona. Los puntos que se encuentran demarcados por un círculo amarillo corresponden a las estaciones de referencia y el punto encerrado por el círculo azul es la estación maestra. Los resultados de lo anterior se pueden apreciar en la Figura 15.

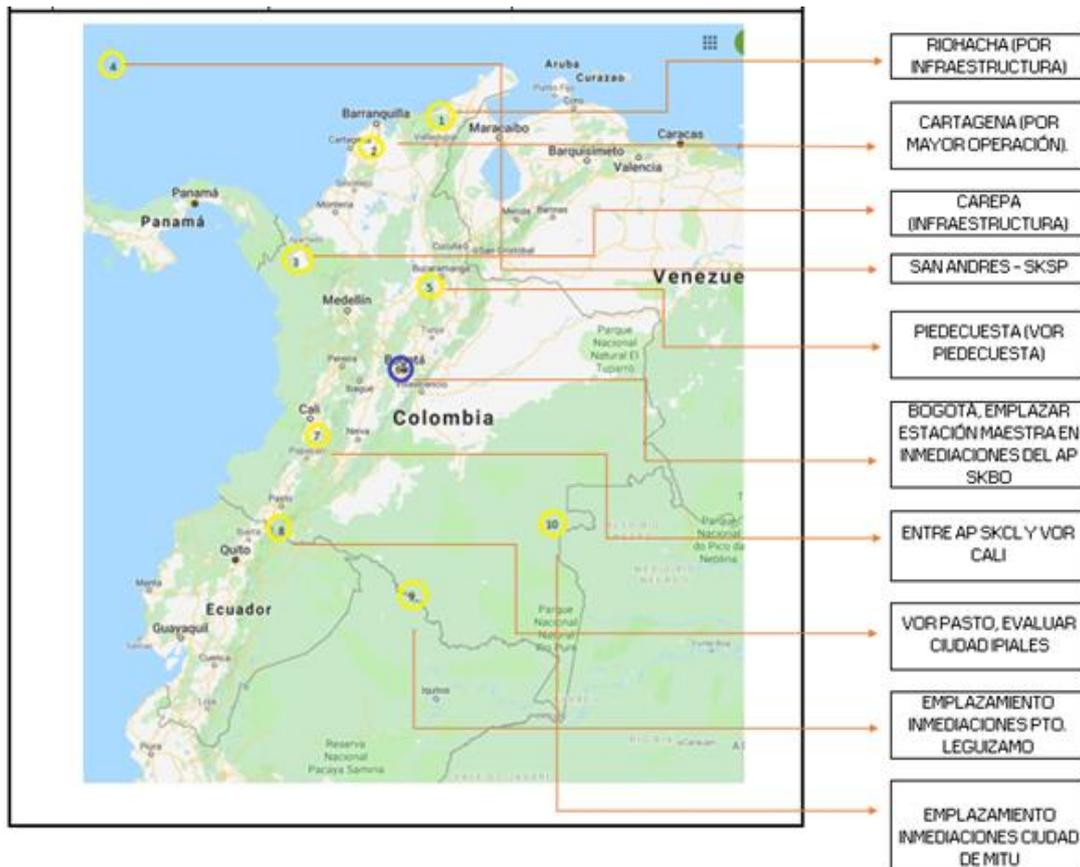


Figura 15. Posible ubicación de las estaciones de referencia y maestra en Colombia.

Fuente: Autores.

5.2.2. Ubicación detallada de las estaciones de referencia preliminar

En esta parte del estudio se analizó el área en el cual se van a emplazar las estaciones de referencia. Además de haber identificado los servicios a la navegación disponibles en cada una de las áreas, se hizo un riguroso análisis de cada sector de acuerdo con los criterios o recomendaciones realizadas por las autoridades aeronáuticas. Asimismo, se definieron una serie de características para cada estación de referencia, tal que, se da a conocer la coordenada de donde será ubicada la estación, la altitud y una breve especificación de la zona.

Por lo anterior, en la Figura 16 se muestra el resultado obtenido después de analizar los 10 puntos posibles para la localización de las estaciones de referencia y maestra.

EMPLAZAMIENTO FINAL ESTACIONES DE REFERENCIA Y MAESTRA	
RIMS 1 RIOHACHA	CARACTERÍSTICAS
	<p>COORDENADAS 11°31'37.5"N 72°55'02.5"W</p> <p>UBICACIÓN Aeropuerto Internacional Almirante Padilla</p> <p>DESCRIPCIÓN Está ubicada a 50 metros del VOR Riohacha y a 100 metros del borde de pista 28 (Designador de pista).</p>
RIMS 2 CARTAGENA	CARACTERÍSTICAS
	<p>COORDENADAS 10°12'30.6"N 75°30'19.8"W</p> <p>UBICACIÓN VOR CARTAGENA</p> <p>DESCRIPCIÓN Está ubicada a 60 metros del VOR Cartagena y aproximadamente 26 km de Aeropuerto Internacional Rafael Nuñez.</p>
RIMS 3 CAREPA	CARACTERÍSTICAS
	<p>COORDENADAS 7°49'11.7"N 76°43'18.9"W</p> <p>UBICACIÓN VOR CAREPA</p> <p>DESCRIPCIÓN Está ubicada a 50 metros VOR Carepa y a 100 metros del borde de pista 15 (Designador de pista) del Aeropuerto Antonio Roldán Betancour.</p>
RIMS 4 SAN ANDRES	CARACTERÍSTICAS
	<p>COORDENADAS 12°34'44.2"N 81°43'13.9"W</p> <p>UBICACIÓN Aeropuerto Internacional Gustavo Rojas Pinilla</p> <p>DESCRIPCIÓN Está ubicado a 800 metros del VOR San Andres y a 80 metros del borde de pista 06 (Designador de pista).</p>
RIMS 5 PIEDECUESTA	CARACTERÍSTICAS
	<p>COORDENADAS 6°53'03.6"N 73°05'31.4"W</p> <p>UBICACIÓN VOR PIEDECUESTA</p> <p>DESCRIPCIÓN Esta ubicado a 50 metros del VOR PIEDECUESTA.</p>

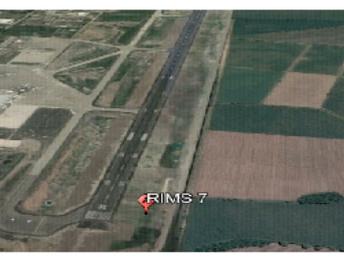
ESTACIÓN MAESTRA BOGOTÁ	CARACTERÍSTICAS	
	COORDENADAS UBICACIÓN DESCRIPCIÓN	4°41'43.6"N 74°08'21.5"W Centro de control UAEAC Ubicada en inmediaciones del centro de control "Edificio Acuario" UAEAC.
RIMS 7 CALI	CARACTERÍSTICAS	
	COORDENADAS UBICACIÓN DESCRIPCIÓN	3°31'48.0"N 76°22'59.4"W Aeropuerto Internacional Alfonso Bonilla Aragón Está ubicada a 100 metros del borde de pista 02 (Designador de pista) y a 14 kilómetros del VOR CALI.
RIMS 8 PASTO	CARACTERÍSTICAS	
	COORDENADAS UBICACIÓN DESCRIPCIÓN	1°23'13.0"N 77°17'35.0"W Aeropuerto Antonio Nariño Está ubicada a 50 metros del borde de pista 02 (Designador de pista) y a 1 kilómetro del VOR PASTO.
RIMS 9 PTO. LEGUIZAMO	CARACTERÍSTICAS	
	COORDENADAS UBICACIÓN DESCRIPCIÓN	0°10'43.0"S 74°46'32.0"W Aeropuerto Cauca Está ubicada a 200 metros del borde de pista 12 (Designador de pista) y a 80 metros del VOR DE PTO. LEGUIZAMO.
RIMS 10 MITÚ	CARACTERÍSTICAS	
	COORDENADAS UBICACIÓN DESCRIPCIÓN	1°14'45.0"N 70°14'10.0"W Aeropuerto Fabio Alberto León Bentley Está ubicada a 50 metros del borde de pista 02 (Designador de pista) y a 413,4 metros del VOR MITÚ.

Figura 16. Emplazamiento detallado estaciones de referencia y maestra preliminar, Google Earth.

Fuente: Autores.

5.3. Ingeniería inversa GAGAN

La zona ecuatorial es la región del planeta con mayor exposición a los rayos solares. Por esta razón la incidencia de radiación es más alta y los contenidos TEC (*Total Electron Content*) es mayor, lo que afecta a las constelaciones de satélites de navegación, como se muestra en la Figura 17 [33].

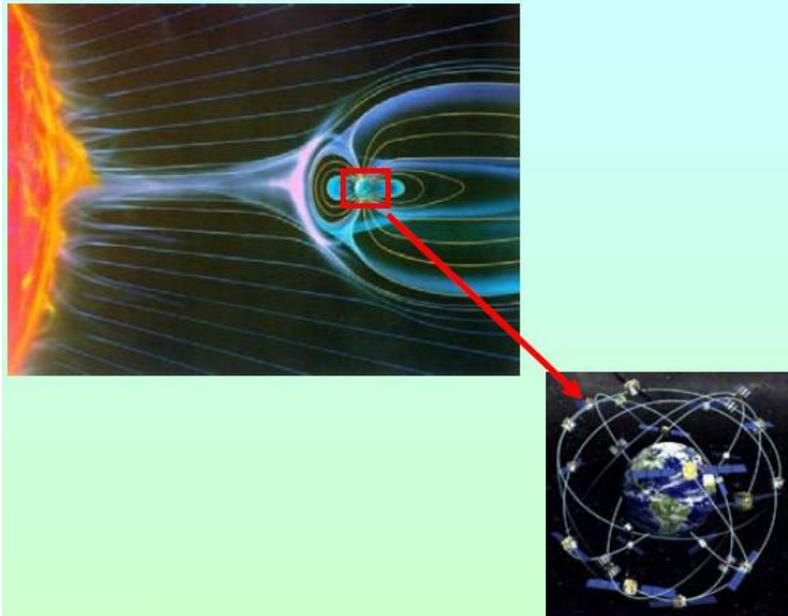


Figura 17, Ionosfera, 2010, PT N°2220 Generación de Escenarios IET y Soporte.

El aumento TEC no es fácil de calcular, se debe generar un algoritmo que tenga en cuenta las variables directas como son, los ciclos solares, el clima, el nivel de contaminación entre otros. En la india tienen un estudio ionosférico con el cual corrigen los errores de distorsión de la señal satelital. Esta corrección se hace por medio del sistema GAGAN. India se encuentra en la zona ecuatorial, por esta se asemeja a las condiciones atmosféricas de Colombia.

En la Figura 18 se puede observar el efecto ionosférico en la región ecuatorial, la cual, fue tomada del *Departamento de Controle do Espaço Aéreo* de Brasil que realizó un estudio de implementación GNSS en el año 2006 [34].

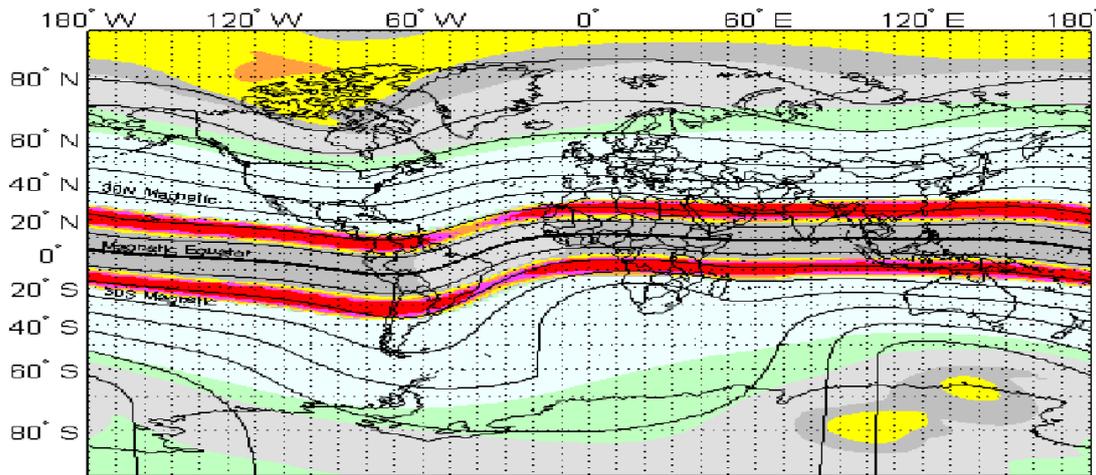


Figura 18, Efecto ionosférico, 2006, Experiencia de Brasil en la Implementación de los Sistemas GNSS.

El segmento terrestre de GAGAN cumple con los requerimientos de antenas estipulados por FAA. Con 15 antenas de referencia instaladas en India se puede dar cobertura a todo el país. Por esta razón se tomó como base para una ingeniería inversa, analizando la cobertura total, el posicionamiento de las 15 estaciones de referencia, y las normativas de posicionamiento FAA.

El procedimiento para la ingeniería inversa del sistema GAGAN fue:

- 1) Delimitar el perímetro de cobertura: se delimitó el perímetro de cobertura de GAGAN con la finalidad de conocer el área la cobertura total y el área de cobertura de cada antena, y si la distancia entre las 15 antenas RIMS del sistema, cumplen las recomendaciones FAA.
- 2) FAA recomienda que las antenas RIMS estén a una distancia mínima de 500 kilómetros. Las antenas RIMS también pueden generar una cobertura óptima a 1000 kilómetros de distancia entre ellas, pero esta disposición está sujeta a las condiciones ionosféricas de la zona de servicio. En la Figura 19 se muestra el perímetro y el área de cobertura de GAGAN.



Figura 19. Perímetro y área de cobertura de sistema GAGAN, Google Earth

Fuente: Autores

Para la zona ecuatorial es necesaria una densidad de antenas mucho mayor. Por esta razón la ubicación de las antenas RIMS se dispone a 500 kilómetros entre ellas. Esto se determinó tomando la ubicación de las antenas RIMS de GAGAN. Este emplazamiento cumple con las recomendaciones FAA y genera la cobertura al perímetro aproximado de 12.500 kilómetros para el territorio de la India. En la Figura 20 se examina la distancia entre las antenas RIMS de GAGAN.

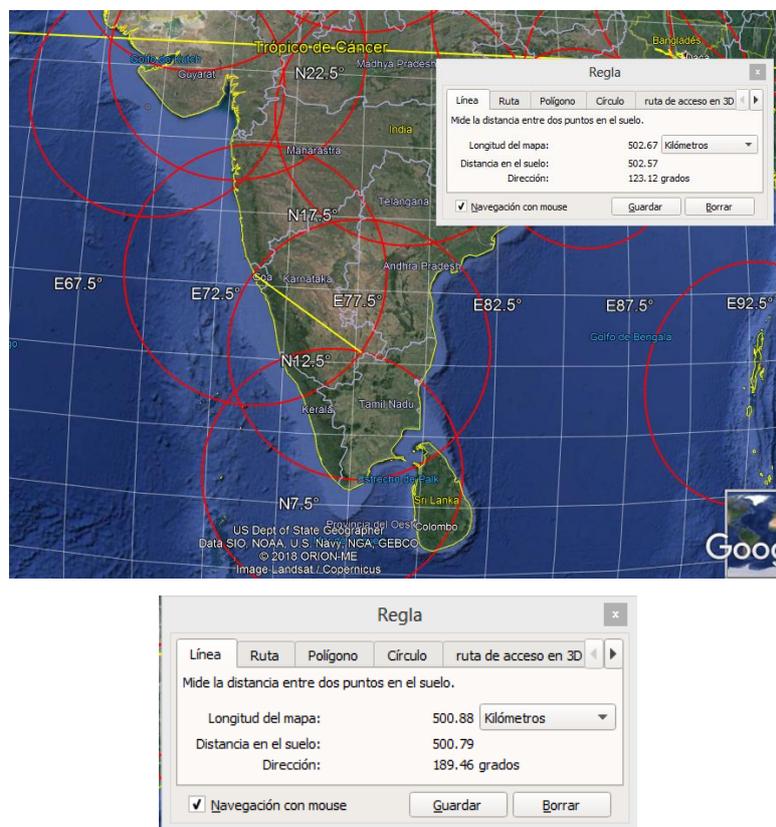


Figura 20. Distancia entre RIMS GAGAN, Google Earth

Fuente: Autores

- 3) Simular la cobertura que generan las antenas RIMS de las estaciones de referencia: las 15 antenas RIMS se ubican en los límites de las áreas terminales. Con RadioMobile³ se emplazaron estas 15 ubicaciones y se les dio un radio de cobertura de 500 kilómetros por antena. La Figura 21 muestra los resultados obtenidos de la simulación de cobertura.

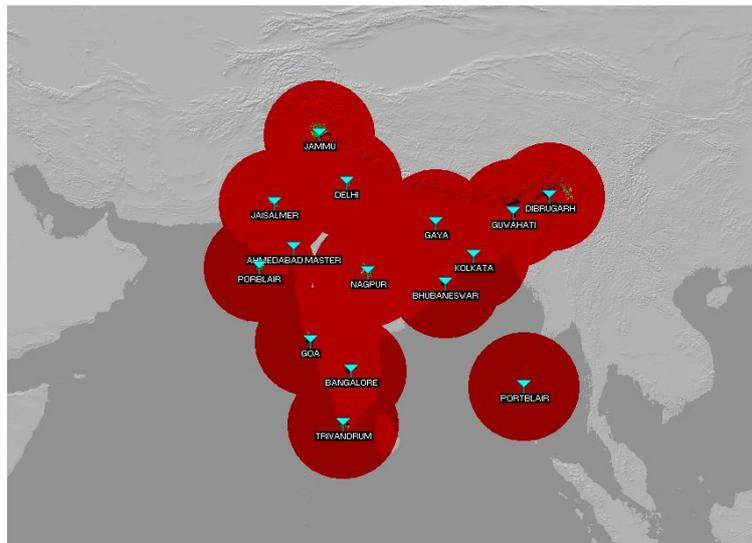


Figura 21. Simulación de las 15 estaciones de referencia GAGAN, RadioMobile.

Fuente: Autor

- 4) Con los resultados de la fase 1, se procede a reducir el posicionamiento de las antenas y ver el cumplimiento de las normativas: en ese sentido, las 10 posibles ubicaciones determinadas para Colombia están a menos de 500 kilómetros de distancia. Tomando en cuenta la necesidad del espacio aéreo, la ingeniería inversa hecha al sistema GAGAN, la ubicación cerca o dentro de aeropuertos internacionales, las recomendaciones de la FAA y el posible modelo ionosférico en zona ecuatorial, se determinaron seis ubicaciones claves para la instalación de las antenas RIMS en Colombia. En la Figura 22 se muestra la ubicación de las seis antenas RIMS con el radio de cobertura.

³ Disponible en > https://www.ve2dbe.com/rmonline_s.asp



Figura 22. Distancia entre antenas RIMS en Colombia, Google Earth

Fuente: Autores

- 5) Comparar la cobertura entre GAGAN y sistema SBAS Colombia: la Figura 23 se muestra la similitud de ubicación geográfica entre India y Colombia y la comparación de las 15 antenas RIMS de GAGAN y las seis ubicaciones propuestas para las antenas RIMS en Colombia.

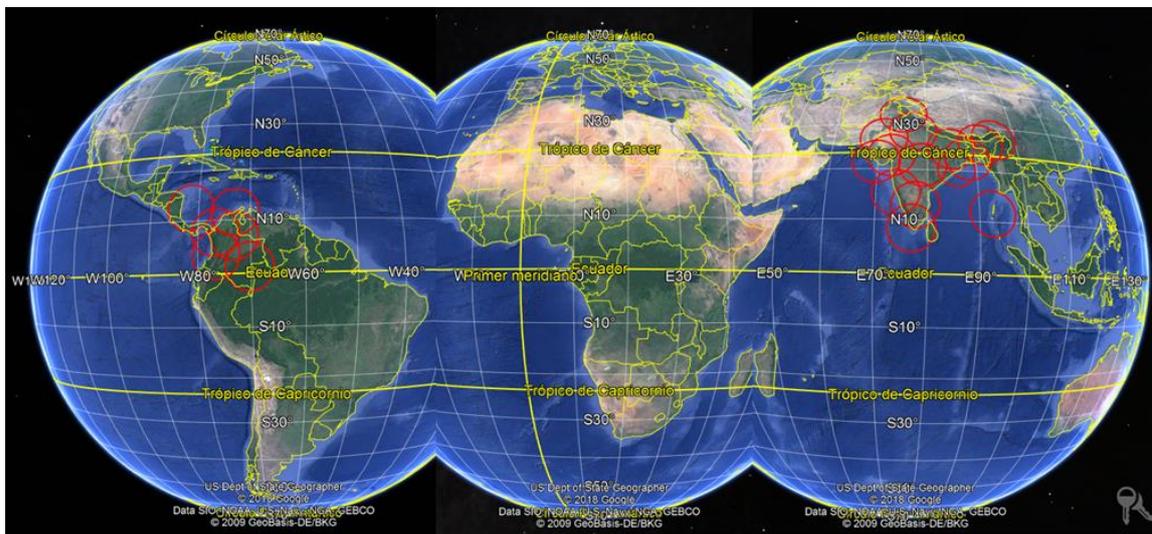


Figura 23. Comparación entre GAGAN y SBAS Colombia, Google Earth

Fuente: Autores

5.3.1 Checklist emplazamiento de las seis estaciones de referencia seleccionadas:

Con base en el desarrollo de la ingeniería inversa y análisis del espacio aéreo en Colombia, se decidió que seis estaciones de referencia darán cobertura a todo el territorio colombiano. Las seis estaciones de referencia seleccionadas para dar cobertura a toda Colombia se pueden apreciar en la Tabla 9.

UBICACIÓN FINAL DE ANTENAS RIMS				
RIMS	AEROPUERTO	VOR	RIMS	COORDENADAS
1	SKRH	RIOHACHA	1	11°31'37.5"N 72°55'02.5"W
2	SKSP	SAN ANDRÉS	4	12°34'44.2"N 81°43'13.9"W
3	SKLC	CAREPA	3	7°49'11.7"N 76°43'18.9"W
4	N/A	PIEDRECUESTA	5	6°53'03.6"N 73°05'31.4"W
5	SKCL	CALI	7	3°31'48.0"N 77°22'59.4"W
6	SKMU	MITU	10	1°14'45.0"N 70°14'10.0"W

Tabla 9. Localización final antenas RIMS

Fuentes: Autores

Con el interés de garantizar la fiabilidad del emplazamiento de las estaciones de referencia en el territorio colombiano, se pretende evaluar por medio de una lista de verificación o Checklist a cada una de las estaciones. Se considera satisfactorio si la estación de referencia mínimo tiene el 50 % aprobado de las recomendaciones dadas por la FAA, además, cada reporte debe estar sujeta a una observación.

Nota: Cada ítem o recomendación tendrá un valor del 20%.

5.3.1.1 RIMS 1 RIOHACHA

La antena RIMS 1 emplazada en la ciudad de Riohacha más específicamente en el Aeropuerto Internacional Almirante Padilla que dará cobertura a todo el sector norte de Colombia cumple con el 100% de los criterios recomendados. Los resultados de la inspección 01 se pueden apreciar en la Tabla 10.

CRITERIOS PARA EL EMPLAZAMIENTO DE LAS ESTACIONES DE REFERENCIA			
ESTACIÓN DE REFERENCIA: RIOHACHA RIMS 1		Inspección: 01	
ACTIVIDAD DE INSPECCIÓN	REPORTE		OBSERVACIONES
	SI	NO	
Las estaciones de referencia deben estar por lo menos a 500 kilómetros alejadas una de las otras.	X		Distancia entre RIM 1 A RIM 3 es de 585,15 km y a RIMS 4 es de 965.48 km.
Se deben ubicar estaciones de referencia en las ciudades que cuentan con aeropuertos, principalmente en aquellos de carácter internacional.	X		La estación está ubicada dentro del Aeropuerto Internacional Almirante Padilla.
Las estaciones se deben ubicarse cerca de los límites de las áreas terminales.	X		Emplazada dentro del área terminal del AP.
En regiones donde exista una forma irregular del terreno las estaciones de referencia deben ubicarse más cerca una de las otras.	X		Perfil de elevación mínimo Nivel del mar.
Aumentar el número de estaciones de referencia y ubicarlas estratégicamente para disminuir el efecto de arqueamiento o inclinación.	X		Revisión Ingeniería Inversa, cuadrícula, ver Figura 22.

Tabla 10. Inspección antena RIMS 1.

Fuente: Autores

5.3.1.2 RIMS 4 SAN ANDRÉS

La antena RIMS 4 emplazada dentro del Aeropuerto Internacional Gustavo Rojas Pinilla cumple con el 100% de las recomendaciones a causa de la inspección que se le ha realizado. Los resultados se pueden apreciar dentro de la Tabla 11.

CRITERIOS PARA EL EMPLAZAMIENTO DE LAS ESTACIONES DE REFERENCIA			
ESTACIÓN DE REFERENCIA: SAN ANDRÉS RIMS 4		Inspección: 02	
ACTIVIDAD DE INSPECCIÓN	REPORTES		OBSERVACIONES
	SI	NO	
Las estaciones de referencia deben estar por lo menos a 500 kilómetros alejadas una de las otras.	X		Distancia entre RIMS 4 a RIMS 1 es de 965.48 km y RIMS 3 es de 759.52 km.
Se deben ubicar estaciones de referencia en las ciudades que cuentan con aeropuertos, principalmente en aquellos de carácter internacional.	X		La estación está ubicada dentro del Aeropuerto Internacional Gustavo Rojas Pinilla.
Las estaciones se deben ubicarse cerca de los límites de las áreas terminales.	X		Emplazada dentro del área terminal del AP.
En regiones donde exista una forma irregular del terreno las estaciones de referencia deben ubicarse más cerca una de las otras.	X		Considerando el perfil de elevación se encuentra un obstáculo con altitud de 836 m.
Aumentar el número de estaciones de referencia y ubicarlas estratégicamente para disminuir el efecto de arqueamiento o inclinación.	X		Revisión Ingeniería Inversa, cuadrícula, ver Figura 22.

Tabla 11. Inspección antena RIMS 4.

Fuente: Autores

5.3.1.3 RIMS 3 CAREPA

La antena RIMS 3 emplazada dentro del Aeropuerto Antonio Roldán Betancour cumple con el 60% de los requerimientos, debido al análisis del perfil de elevación del terreno entre las estaciones más cercanas a esta, se encuentran obstáculos con una altitud considerable para interferir con la continuidad de la señal. Los resultados se aprecian en la Tabla 12.

CRITERIOS PARA EL EMPLAZAMIENTO DE LAS ESTACIONES DE REFERENCIA			
ESTACIÓN DE REFERENCIA: CAREPA RIMS 3		Inspección: 03	
ACTIVIDAD DE INSPECCIÓN	REPORTE		OBSERVACIONES
	SI	NO	
Las estaciones de referencia deben estar por lo menos a 500 kilómetros alejadas una de las otras.		X	Distancia entre RIMS 3 y RIMS 5 es de 413.91 km y a RIMS 7 es de 475.88 km.
Se deben ubicar estaciones de referencia en las ciudades que cuentan con aeropuertos, principalmente en aquellos de carácter internacional.		X	Está ubicada dentro del Aeropuerto Antonio Roldán Betancour.
Las estaciones se deben ubicarse cerca de los límites de las áreas terminales.	X		Emplazada dentro del área terminal del AP.
En regiones donde exista una forma irregular del terreno las estaciones de referencia deben ubicarse más cerca una de las otras.	X		Conforme al perfil de elevación del terreno se ubican las RIMS más cerca entre sí (Obstáculo con una altitud de 3.325 km).
Aumentar el número de estaciones de referencia y ubicarlas estratégicamente para disminuir el efecto de arqueamiento o inclinación.	X		Revisión Ingeniería Inversa, cuadrícula, ver Figura 22.

Tabla 12. Inspección antena RIMS 3.

Fuente: Autores.

5.3.1.4 RIMS 5 PIEDECUESTA

La antena RIMS 5 PIEDECUESTA cumple con el 60% de las recomendaciones. Esta estación se encuentra en un sector clave dentro de la navegación aérea dentro de Colombia, por lo que, la distancia a las otras estaciones deben estar más cerca a causa del perfil de elevación del terreno y el gran número de operaciones que sobrevuelan esta zona. Los resultados se aprecian en la Tabla 13.

CRITERIOS PARA EL EMPLAZAMIENTO DE LAS ESTACIONES DE REFERENCIA			
ESTACIÓN DE REFERENCIA: PIEDECUESTA RIMS 5		Inspección: 04	
ACTIVIDAD DE INSPECCIÓN	REPORTES		OBSERVACIONES
	SI	NO	
Las estaciones de referencia deben estar por lo menos a 500 kilómetros alejadas una de las otras.	X		Distancia a RIMS 7 es de 520.26 km. A RIMS 3 es de 413.91 km.
Se deben ubicar estaciones de referencia en las ciudades que cuentan con aeropuertos, principalmente en aquellos de carácter internacional.		X	Emplazada en inmediaciones del VOR PIEDECUESTA.
Las estaciones se deben ubicarse cerca de los límites de las áreas terminales.		X	Emplazada en inmediaciones del VOR PIEDECUESTA
En regiones donde exista una forma irregular del terreno las estaciones de referencia deben ubicarse más cerca una de las otras.	X		De acuerdo con el perfil de elevación se determinó la presencia de un obstáculo de 2.177 km de altitud.
Aumentar el número de estaciones de referencia y ubicarlas estratégicamente para disminuir el efecto de arqueamiento o inclinación.	X		Revisión Ingeniería Inversa, cuadrícula, ver Figura 22.

Tabla 13. Inspección antena RIMS 5.

Fuente: Autores.

5.3.1.5 RIMS 7 CALI

La antena RIMS 7 emplazada en la ciudad de Cali más específicamente en el Aeropuerto Internacional Alfonso Bonilla Aragón cumple con el 100% de las recomendaciones. Sin embargo, se debe considerar el perfil de elevación del terreno para garantizar la continuidad de la señal. Ver Tabla 14.

CRITERIOS PARA EL EMPLAZAMIENTO DE LAS ESTACIONES DE REFERENCIA			
ESTACIÓN DE REFERENCIA: CALI RIMS 7		Inspección: 05	
ACTIVIDAD DE INSPECCIÓN	REPORTES		OBSERVACIONES
	SI	NO	
Las estaciones de referencia deben estar por lo menos a 500 kilómetros alejadas una de las otras.	X		Distancia a la RIMS 10 es de 728.81 km y a la RIMS 5 de 520.26 km
Se deben ubicar estaciones de referencia en las ciudades que cuentan con aeropuertos, principalmente en aquellos de carácter internacional.	X		Está ubicada dentro del Aeropuerto Internacional Alfonso Bonilla Aragón.
Las estaciones se deben ubicarse cerca de los límites de las áreas terminales.	X		Emplazada dentro del área terminal del AP.
En regiones donde exista una forma irregular del terreno las estaciones de referencia deben ubicarse más cerca una de las otras.		X	Respecto al perfil de elevación del terreno se encuentra un obstáculo a 3.962 km de altitud.
Aumentar el número de estaciones de referencia y ubicarlas estratégicamente para disminuir el efecto de arqueamiento o inclinación.	X		Revisión Ingeniería Inversa, cuadrícula, ver Figura 22.

Tabla 14. Inspección antena RIMS 7.

Fuente: Autores.

5.3.1.6 RIMS 10 MITÚ

La antena RIMS 10 emplazada dentro del Aeropuerto Fabio Alberto León Bentley cumple con el 80 % de las recomendaciones. Cabe aclarar que la estación se ubica en este sector debido a los perfiles de elevación de las estaciones RIMS 7 y 5 con el interés de aumentar la continuidad y disponibilidad de la recepción de la señal GPS. Ver Tabla 15.

CRITERIOS PARA EL EMPLAZAMIENTO DE LAS ESTACIONES DE REFERENCIA			
ESTACIÓN DE REFERENCIA: MITÚ RIMS 10		Inspección: 06	
ACTIVIDAD DE INSPECCIÓN	REPORTES		OBSERVACIONES
	SI	NO	
Las estaciones de referencia deben estar por lo menos a 500 kilómetros alejadas una de las otras.	X		Distancia a la RIMS 5 es de 699.46 km y a la RIMS 7 es de 728.81 km.
Se deben ubicar estaciones de referencia en las ciudades que cuentan con aeropuertos, principalmente en aquellos de carácter internacional.		X	Está ubicada dentro del Aeropuerto Fabio Alberto León Bentley.
Las estaciones se deben ubicarse cerca de los límites de las áreas terminales.	X		Emplazada dentro del área terminal del AP.
En regiones donde exista una forma irregular del terreno las estaciones de referencia deben ubicarse más cerca una de las otras.	X		Se analizó el perfil de elevación, obstáculo de 3.678 km de altitud.
Aumentar el número de estaciones de referencia y ubicarlas estratégicamente para disminuir el efecto de arqueamiento o inclinación.	X		Revisión Ingeniería Inversa, cuadrícula, ver Figura 22.

Tabla 15. Inspección antena RIMS 10.

Fuente: Autores.

5.4. FASE 3: Simulación En Radio Mobile En Zonas Col, Car/Sam (Centro-Sur)

Con los criterios de la OACI, la determinación de emplazamiento de las antenas, y la cantidad de antenas, se simuló en RadioMobile la cobertura de las regiones CAR-COL, SAM-CENTRO/COL, SAM-SUR/COL. En la Tabla 16 se esquematiza la ubicación de cada antenas en las regiones.

ZONAS DE COBERTURA CAR/SAM			
CAR-COL		SAM-COL	
NOMBRE	COORDENADAS	NOMBRE	COORDENADAS
RIOHACHA	11 31 39 N 072 55 03 W	PIEDRECUESTA	06 53 02 N 073 05 31 W
SAN ANDRÉS	12 34 57 N 081 42 19 W	CALI	03 24 07 N 076 24 20 W
CAREPA	07 49 05 N 076 43 19 W	MITÚ	01 14 32 N 070 14 12 W

Tabla 16. Zonas de cobertura SAM/CAR-COL.

Fuente: Autores.

Tres antenas cubren la zona CAR. La ubicación de la isla de San Andrés representa la cobertura en la región marítima del caribe de Colombia. Las antenas se emplazan en los aeropuertos, ya que las antenas RIMS no generan ninguna clase de interferencia con el resto de radioayudas que hay en los aeropuertos. En el caso particular de San Andrés, en caso de no poder ubicar la antena RIMS en zonas cercanas a borde de pista, se debe buscar una zona cerca al VOR de San Andrés. Es de gran importancia para la cobertura total del territorio colombiano, el emplazamiento en la isla.

La antena de Riohacha da cobertura a la región continental del caribe colombiano y conecta con la región marítima de la señal de la antena de San Andrés. El aeropuerto internacional de Riohacha es una ubicación apropiada, debido a que cumple todos los estándares OACI, y cubre la región de navegación aérea de todos los sobrevuelos de la zona norte. Como se demostró en la fase 1, estos sobrevuelos son los que conectan el sur de América con Europa y los países caribeños.

La ubicación de Carepa da cobertura a la zona norte de la cordillera occidental y conecta la zona CAR de San Andrés y Riohacha. Esta ubicación daría cobertura a toda la zona CAR y parte de zona SAM. La Figura 24 muestra la simulación en RadioMobile de la cobertura CAR de estas tres antenas.

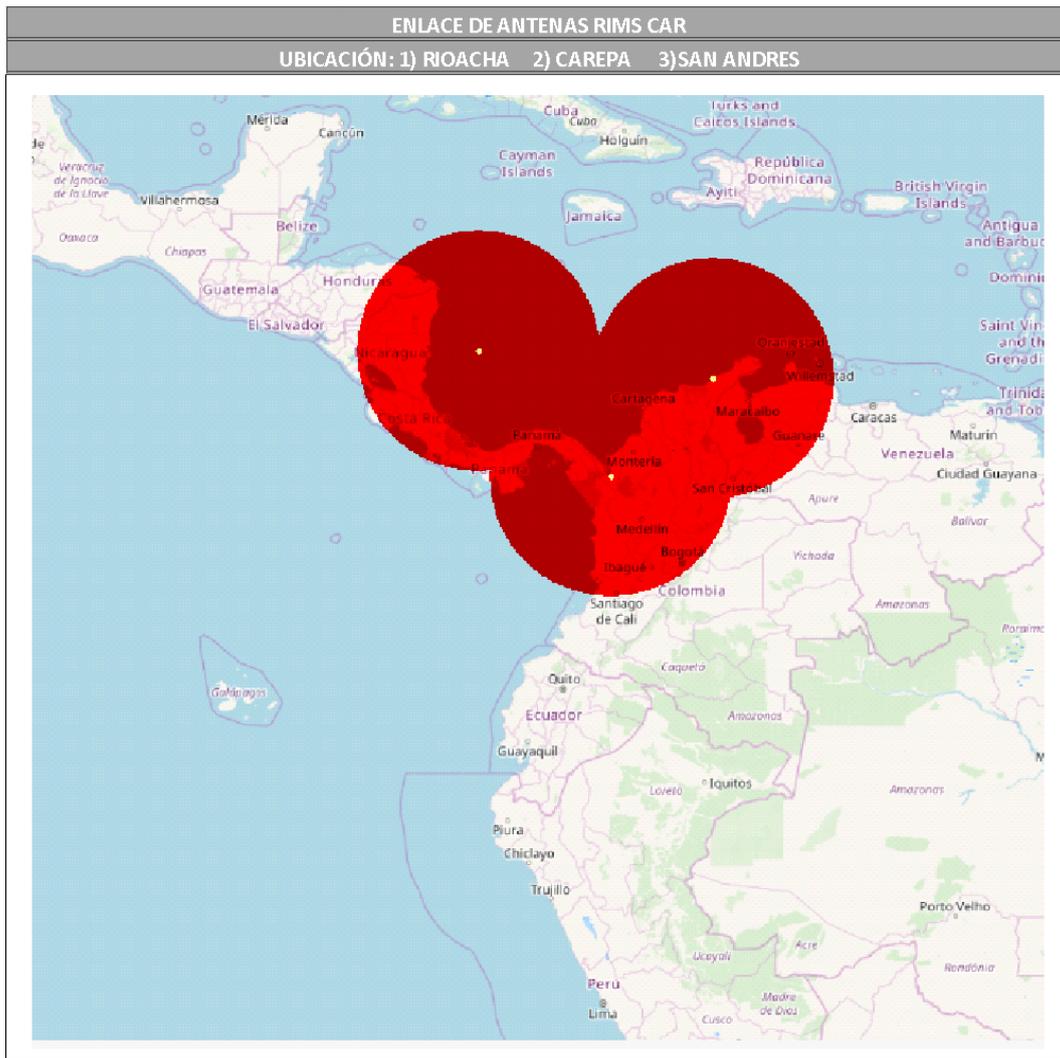


Figura 24. Ubicación de antenas RIMS para cobertura CAR, simulación RadioMobile.

Fuente: Autores.

La antena ubicada en la estación VOR Piedecuesta cubre la zona centro de Colombia dando cobertura a la región andina del país. No se tuvo en cuenta la zona adyacente a Bogotá, debido a que no cumple con los estándares de OACI con respecto a la distancia entre antenas.

Piedecuesta es una ubicación favorable para la navegación aérea debido a que todo vuelo que sale del aeropuerto ElDorado, con rumbo norte, debe rodear la zona aérea no navegable, ubicada en la cordillera central de los andes, impuesta por el ministerio de defensa colombiano. En esta zona se encuentra la base de defensa militar de la Fuerza Aérea Colombiana, llamada Palanqueros. Es la base de defensa aérea de respuesta primaria del país. Por esta razón todos los vuelos comerciales deben rodear este espacio aéreo, lo que convierte a la zona de la cordillera oriental en un espacio activo para la navegación aérea. La Figura 25 muestra la cobertura de la zona de

Piedecuesta.

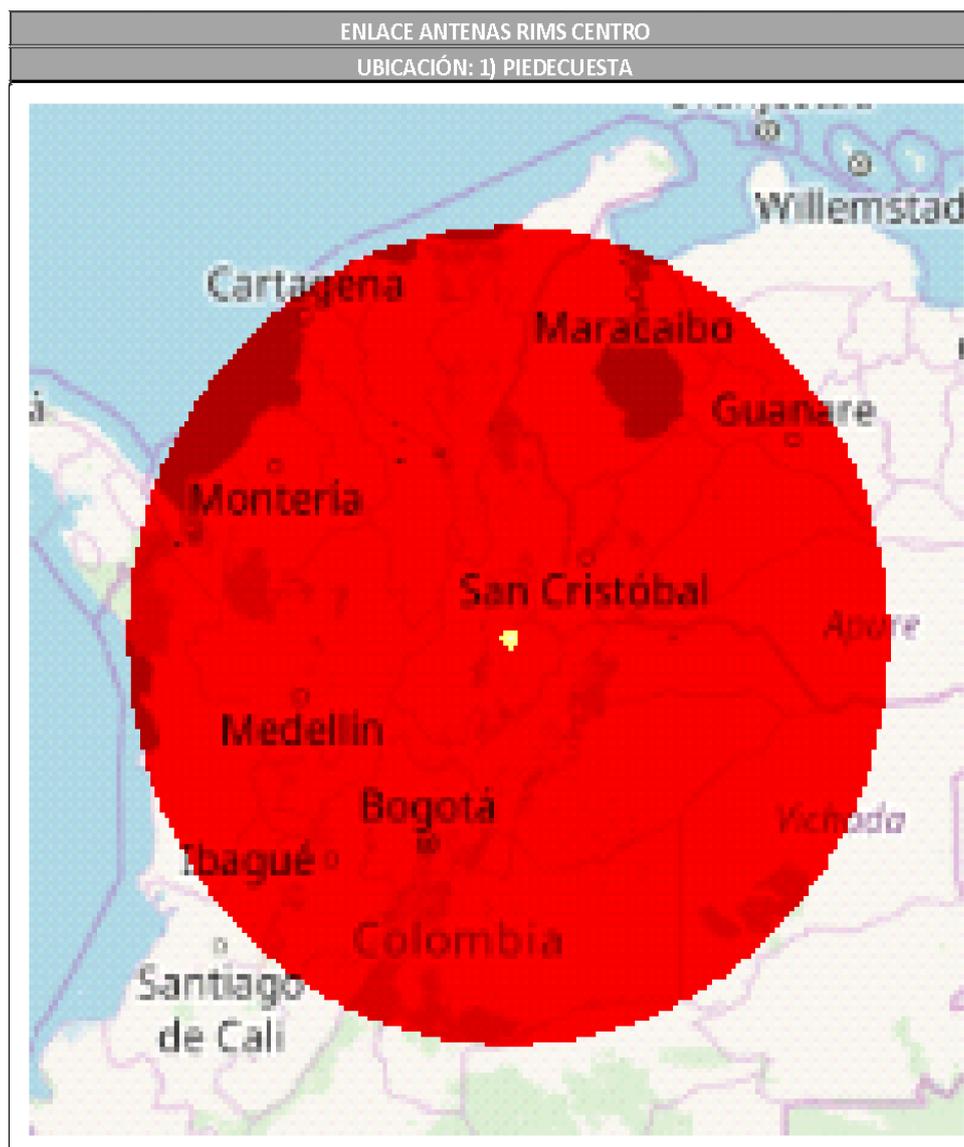


Figura 25. Ubicación de antenas RIMS para cobertura SAM-CENTRO/COL, simulación RadioMobile.

Fuente: Autores.

Dos antenas cubren la zona CAR. La ubicación de la antena en Cali, representa la cobertura de la zona sur-occidente del país. Cubre la zona andina sur y la zona marítima del pacífico. En la fase 1 se determinó que esta zona cubre los sobrevuelos que viene del sur del continente. Siendo una zona impotente para la conectividad de los vuelos precedente de Ecuador, Perú, Chile, Argentina, Uruguay y Paraguay, con el norte y centro de América.

La ubicación de la antena de Mitú, representa la cobertura de la zona sur-oriente del país. La importancia de esta zona se da para la conectividad de los vuelos procedentes de Brasil. La Figura 26 se muestra la cobertura de estas dos antenas en la zona SAM.

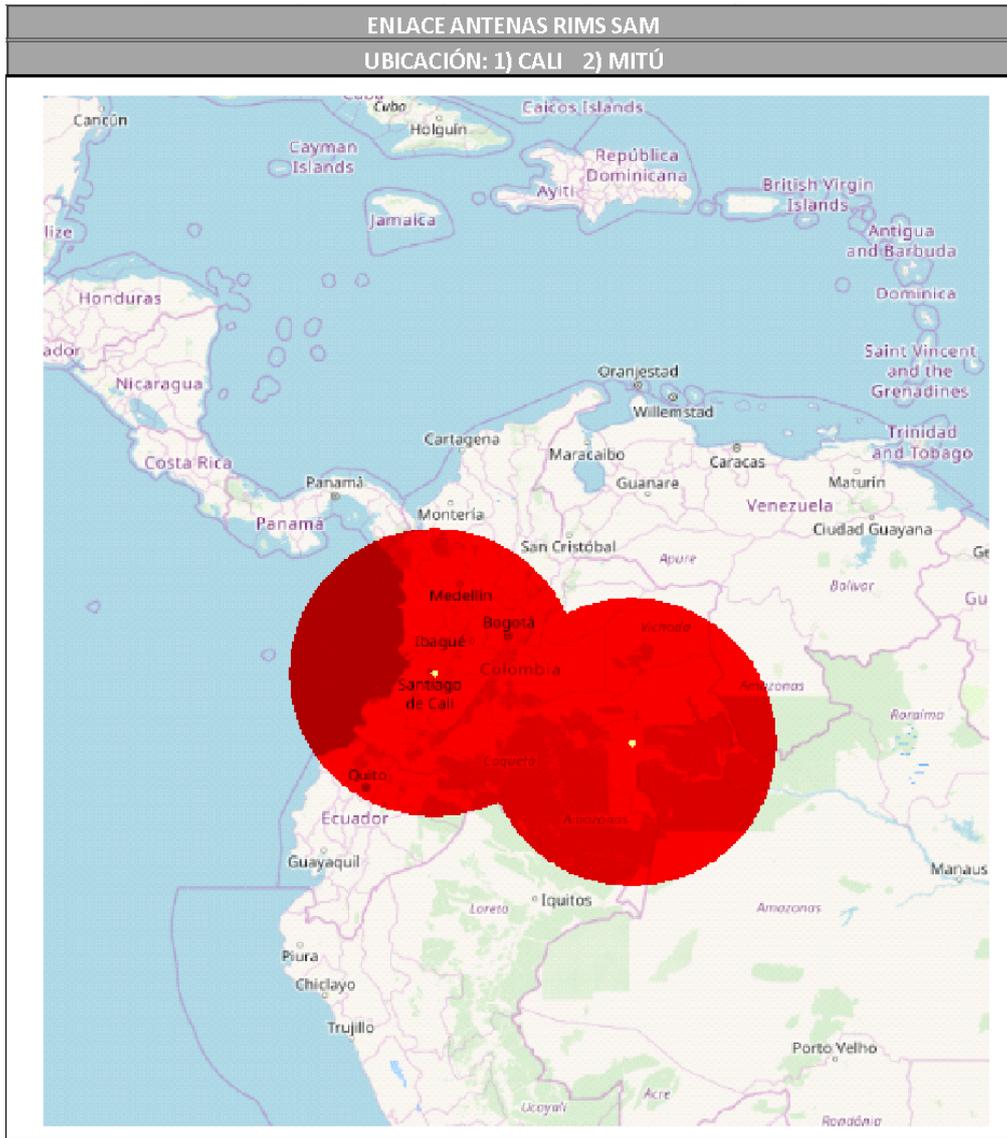


Figura 26. Ubicación de antenas RIMS para cobertura SAM, simulación RadioMobile.

Fuente: Autores.

5.4.1. Cobertura de Colombia, zonas CAR/SAM

Las seis antenas propuestas dan cobertura a todo el país, cumpliendo con los estándares OACI de emplazamiento. Para la ubicación de las antenas se tuvo en cuenta el lugar específico, el cual, debe ser en un aeropuerto internacional o en cerca de un VOR, como es el caso de Piedecuesta y Carepa. La Figura 27 muestra la cobertura de las seis antenas propuestas y la conectividad que brinda para el sur y el centro del continente Americano. La cobertura fue realizada en RadioMobile.

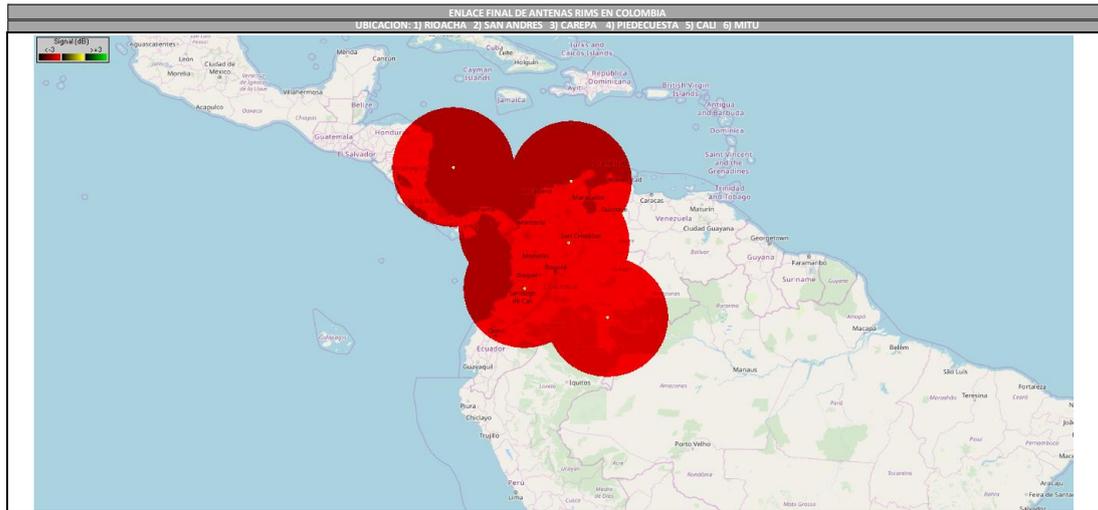


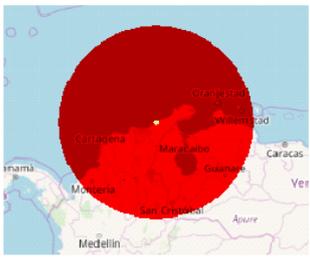
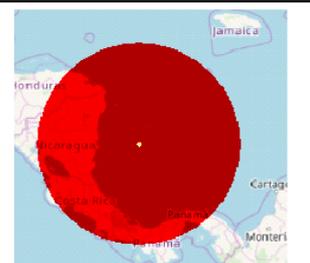
Figura 27. Ubicación de las seis antenas RIMS para cobertura del territorio colombiano y zonas SAM/CAR, simulación RadioMobile.

Fuente: Autores.

Espacio intencionalmente dejado en blanco

5.4.2. Detalles de la ubicación de las estaciones de referencia

Para la recepción de la señal, se debe tomar en cuenta factores como: clima, altitud, la recepción de la señal, la categoría del aeropuerto donde se va a emplazar la antena y la zona de importancia de navegación. Basados en estos factores se determinó el canal de las antenas RIMS. Se hizo una tabla de datos para la ubicación y el canal de la antena RIMS. La Tabla 17 detalla las especificaciones nombradas anteriormente.

RIMS RIOACHA	CARACTERISTICAS
	<p>CORDENADAS 11 31 37 N 072 55 02 W UBICACIÓN AEROPUERTO INTERNACIONAL ALMIRANTE PADILLA ALTITUD 13,10 m TEMPERATURA DE REFERENCIA 34,8 °C CATEGORIA 6 CANAL RIMS A B REGION DE COBERTURA CAR - COL</p>
RIMS SAN ANDRES	CARACTERISTICAS
	<p>CORDENADAS 12 34 44 N 081 43 13 W UBICACIÓN AEROPUERTO INTERNACIONAL GUSTAVO ROJAS PINILLA ALTITUD 7,36 m TEMPERATURA DE REFERENCIA 31°C CATEGORIA 7 CANAL RIMS A B C REGION DE COBERTURA CAR - COL</p>
RIMS CAREPA	CARACTERISTICAS
	<p>CORDENADAS 07 49 11 N 076 43 19 W UBICACIÓN VOR CAREPA ALTITUD 16 m TEMPERATURA DE REFERENCIA 34°C CATEGORIA 4 CANAL RIMS A B REGION DE COBERTURA CAR / SAM - COL</p>
RIMS PIEDECUESTA	CARACTERISTICAS
	<p>CORDENADAS 06 53 03 N 073 05 31 W UBICACIÓN VOR PIEDECUESTA ALTITUD 1005 m TEMPERATURA DE REFERENCIA 28°C CATEGORIA CANAL RIMS A B C REGION DE COBERTURA CENTRO - COL</p>

RIMS CALI	CARACTERISTICAS
	CORDENADAS 03 31 02 N 076 22 59 W UBICACIÓN AEROPUERTO INTERNACIONAL ALFONSO BONILLA ARAGÓN ALTITUD 964 m TEMPERATURA DE REFERENCIA 33°C CATEGORIA 8 CANAL RIMS A B REGION DE COBERTURA CENTRO / SAM - COL
RIMS MITÚ	CARACTERISTICAS
	CORDENADAS 01 14 45 N 070 14 10 W UBICACIÓN AEROPUERTO FABIO ALBERTO LEÓN BENTLEY ALTITUD 207 m TEMPERATURA DE REFERENCIA 32°C CATEGORIA 5 CANAL RIMS A B REGION DE COBERTURA SAM - COL

Tabla 17. Características de la ubicación de antenas RIMS.

Fuente: Autores.

Espacio intencionalmente dejado en blanco

5.5.FASE 4: Estación Maestra

El centro de control maestro de procesamiento, utiliza los datos recopilados por las estaciones de monitoreo, para corregir el error proporcionado por los relojes entre los usuarios y los satélites, y elabora un modelo para error ionosférico sobre el área de servicio requerida, para compensar la perturbación ionosférica a las señales de navegación [35].

Las estaciones maestras gestionan los datos del sistema e infraestructura terrestre que son críticos para la seguridad del sistema. De forma cíclica, las estaciones maestras rotan copias de seguridad en frío y en caliente, para proporcionar operaciones continuas durante las 24 horas del día [36].

5.5.1. Ionosfera Terrestre

El error ionosférico es el mayor reto a solucionar por los sistemas de aumentación. Se debe tener en cuenta factores como la densidad de electrones libres, el tiempo que transcurre entre la recepción de la señal GPS por el receptor, la sincronización de los relojes del receptor y el satélite. Klobuchar es un modelo ionosférico que reduce a 350 km de altura la capa de error ionosférico, en el cual se calcula un punto IP donde la señal del GPS estima el contenido total de electrones proyectados STEC, y reduce entre 50-60% de error ionosférico [37]. En la figura 28 se ilustra el modelo Klobuchar.

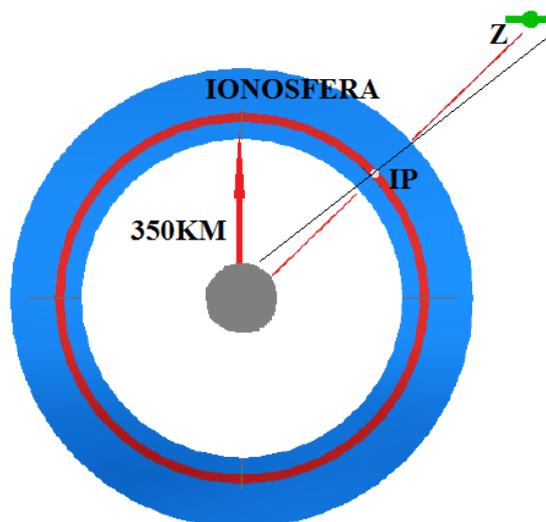


Figura 28, Modelo ionosférico de Klobuchar.

Esquema: autores.

Para tener un estimado de la ionosfera y el error que produce, SACCSA realizó un estudio con los datos recopilados por las estaciones satelitales IGS, con la finalidad de generar un análisis estadístico, para tener un estimado del contenido de electrones STEC.

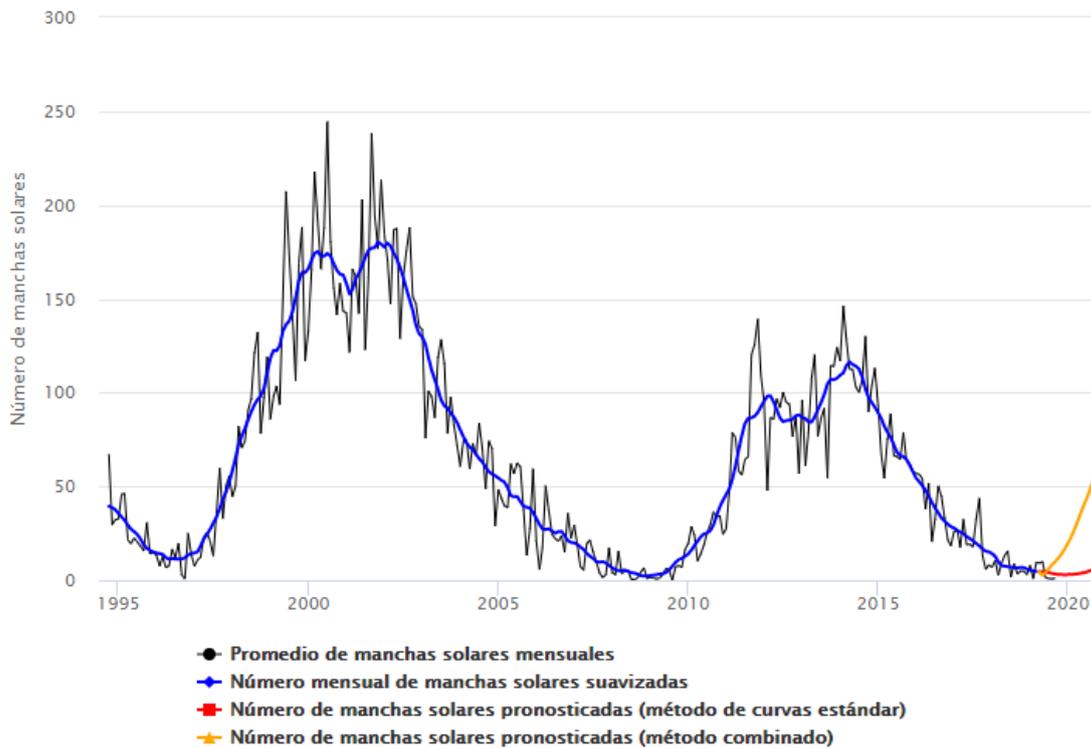
Se consideraron dos tipos de análisis para el estudio:

- Análisis basado en los archivos de datos IONEX (*IONosphere Map Exchange Format*), con la finalidad de proporcionar una estadística de, *vertical* TEC (*Total Electron Content*) de la ionosfera.
- El procesamiento de los datos recopilados de archivos de observación y RINEX (*Receiver Independent Exchange Format*), se utilizaron como parámetros iniciales para un algoritmo ionosférico.

SACCSA evaluó los ciclos solares entre el año 2000 y 2006, donde determinaron que los ciclos solares del año 2002 fueron los más altos y por ende fue el de mayor precisión en el STEC, debido a que el algoritmo evaluó el error con respecto al dato máximo de *Vertical* TEC. Usaron el algoritmo GILION para determinar un estimado de precisión de la cobertura en la región CAR/SAM [38].

Los ciclos solares son variables. Se pueden extrapolar los datos los resultados obtenidos en los seis años del estudio ionosférico realizado por SACCSA, en donde los ciclos solares de los años 2000 a 2006, tengan similitud con los ciclos solares de los años 2015 al 2019, con una predicción para el año 2020. En la Gráfica 4 se muestran los ciclos solares desde el año 2000 al 2019. Se puede observar la similitud del ciclo solar del año 2006 al ciclo solar del año 2019 y la predicción para el año 2020. Se puede determinar que las condiciones de la ionosfera en 2006 es semejante a las condiciones del 2019 y a las predicciones para el 2020, lo que da validez a los datos de precisión de la señal, que reciben las estaciones de monitoreo de los satélites GPS.

Los ciclos solares no han superado el máximo evaluado del año 2002, lo que significa que el error máximo aproximado puede servir de referencia para la simulación de las señales satelitales de los años subsiguientes.



Gráfica 4.⁴ Progresión del ciclo solar, www.spaceweatherlive.com, 2019.

Fuente: spaceweatherlive.com

En el lapso de los seis años del estudio, se obtuvieron valores máximos y mínimos de *Vertical* TEC, donde a baja actividad solar es aproximadamente 50% menos que los años de alta actividad solar. El algoritmo esquematizó los valores máximos de *Vertical* TEC, y concluyó que, en los años de mayores ciclos solares, la anomalía corresponde a un aproximado de 164 TECu, (TEC Unit= $10^{16}e/m^2$) [39], lo que es equivalente a un retraso de 26 metros para las señales en frecuencia L1 en la región ecuatorial. En la Figura 29 se esquematiza la anomalía en los años de mayores ciclos solar [4]. La imagen 2 está a una escala de medición de TECu.

⁴ Disponible en: www.spaceweatherlive.com

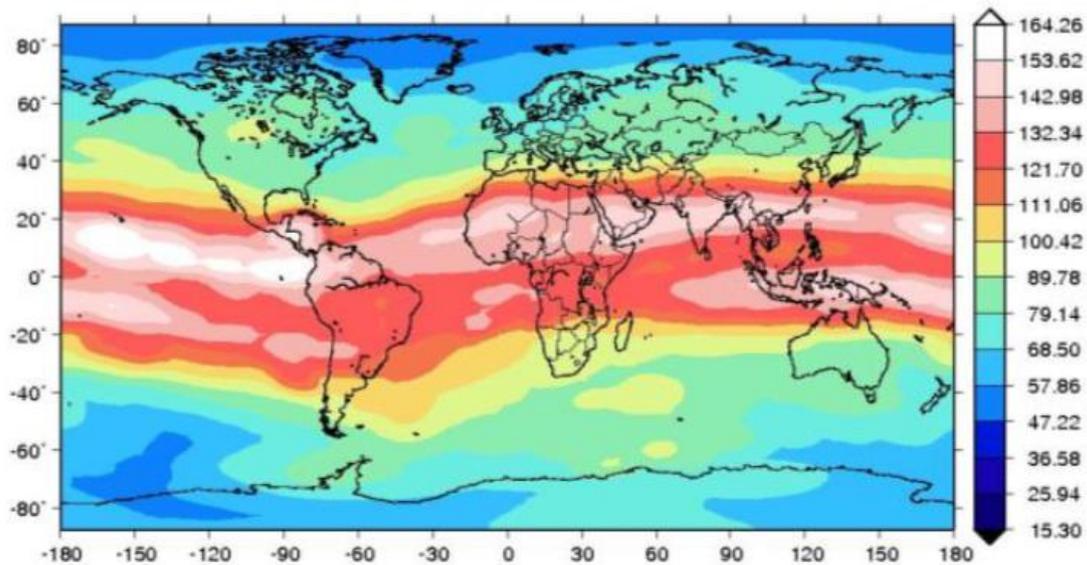


Figura 29.⁵Maximum Vertical Total Electron Values and Spatial Gradients Statistical Analysis, Ionospheric Analysis in the Equatorial Region: Impact on GNSS Performance, 2006.

5.5.2. Disponibilidad De Satélites GPS En La Región Ecuatorial

Cada antena RIMS debe recibir la señal directa de los satélites. Cada señal consta de tres satélites que emiten a un mismo punto y triangulan la posición en x, y, z. Para estándares de GNSS se debe usar 4 satélites, calculando el error ionosférico, y las variables climáticas, los satélites generan una señal con precisión SBAS.

En el estudio SACCSA utilizaron el satélite Inmarsat 3F-4 para generar la simulación del enlace de señales SBAS, con la finalidad de esquematizar la cobertura de la señal corregida, que se tomó con las estaciones de monitoreo, las estaciones de monitoreo se pueden ver en la figura 10, del capítulo 7, Estado del Arte. El satélite Inmarsat 3F-4 fue reemplazado en febrero del 2016 por el satélite Inmarsat 3F-5 [40]. En la página web <http://stuffin.space> se visualizan todos los satélites artificiales que orbitan la tierra. La Figura 30 muestra la órbita del satélite Inmarsat 3F-5.

⁵ “Ionospheric Analysis in the Equatorial Region: Impact on GNSS Performances”

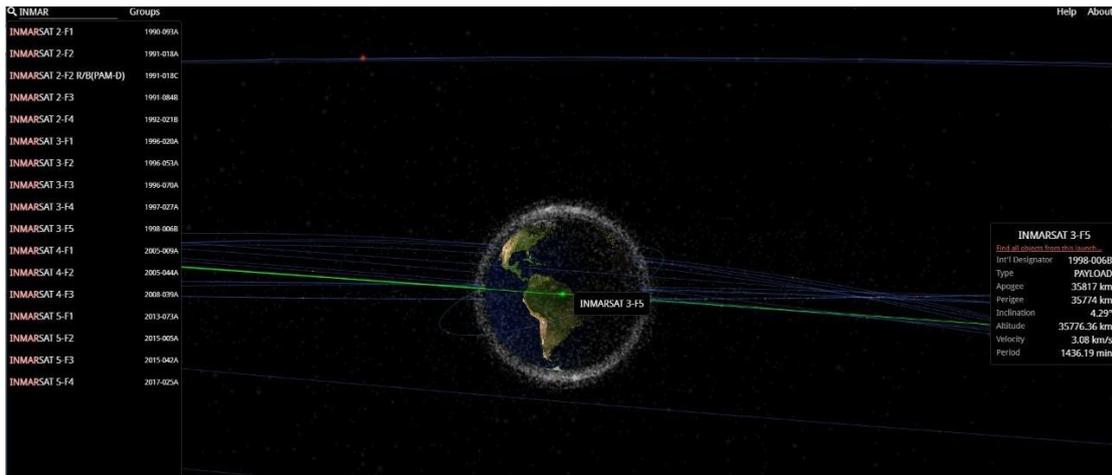


Figura 30. Órbita del satélite Inmarsat 3F-5, satélite de comunicación.

Fuente: stuffin.space

Las órbitas GEO se encuentran a una altura de 35000 Km o más. Esta altura les da un radio de cobertura de casi toda la cara visible de la tierra, con la excepción de los polos. Con el programa Orbitron se puede visualizar el rango de cobertura proyectado en un plano de dos dimensiones, y proporciona los datos orbitales, con los cuales se pueden generar las simulaciones de señales captadas por las antenas RIMS. La Figura 31 muestra la disponibilidad y rango de cobertura de los satélites GEO. Para esta esquematización se visualizan los satélites de comunicación Inmarsat.

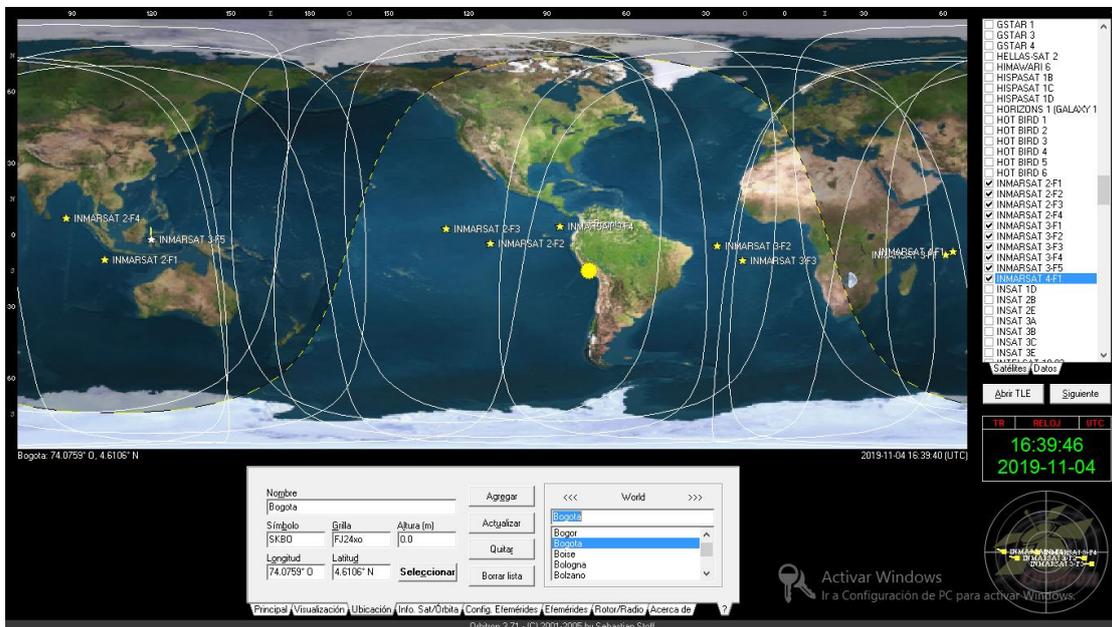


Figura 31. Cobertura de satélites GEO en zona ecuatorial.

Fuente: Orbitron.

5.5.3.Arquitectura Estación De Referencia

Para el emplazamiento de las antenas RIMS se debe cumplir unos parámetros de construcción conforme al tipo de antena que se utilice. Las antenas RIMS que se emplazaron en el territorio colombiano están dentro de los límites de área terminal de los aeropuertos. Según el tipo de antena y zona en la que se va a emplazar la estación de referencia debe cumplir los siguientes parámetros de seguridad:

- La antena debe estar instalada sobre una base en su defecto en material frangible,
- Debe estar dentro de un cuadro de concreto en su defecto,
- El cuadro debe estar delimitado por una línea o franja blanca y,
- Ocho bolardos en su defecto hechos en material frangible y deben estar pintados de color blanco y rojo aleatoriamente.

Los resultados se pueden apreciar en la Figura 32.

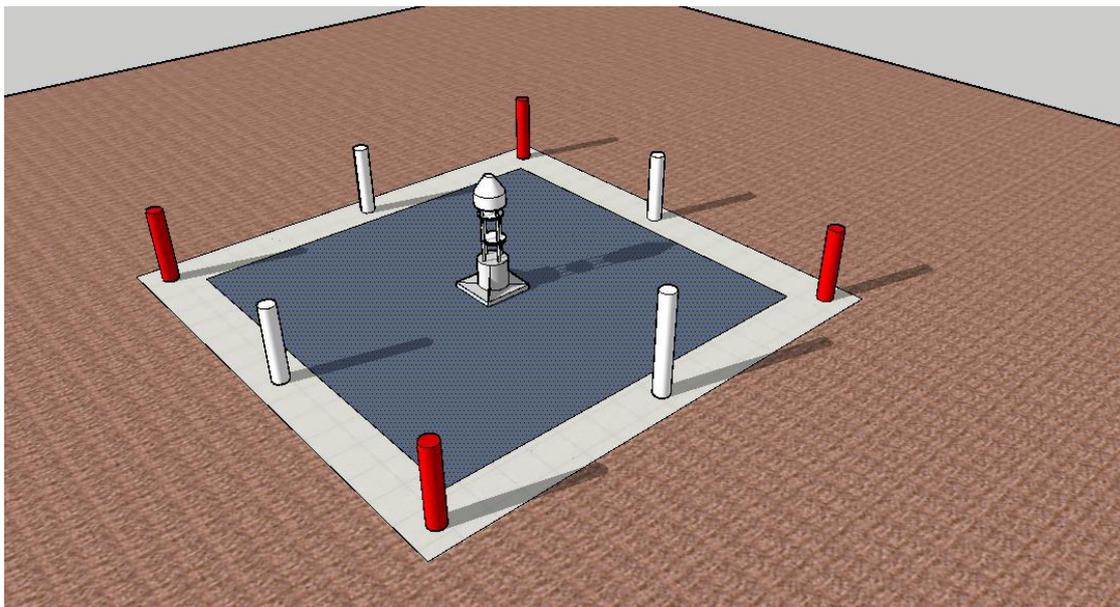


Figura 32. Diseño de la estación de referencia (antena RIMS), SketchUP Pro-2019.

Fuente: Autores.

5.5.4. Simulación STK Enlace Antenas RIMS Y Constelación GPS

Con el interés de simular la comunicación entre las antenas RIMS y la constelación GPS se utilizó el software STK. Se ubicaron las seis estaciones de referencia de acuerdo con las coordenadas determinadas anteriormente como se puede apreciar en la Tabla 9 “Localización final antenas RIMS” capítulo 8, fase 2, ítem 8.2.4. Por lo anterior, se puede apreciar en la Figura 33 la cobertura de las antenas dentro del territorio colombiano.

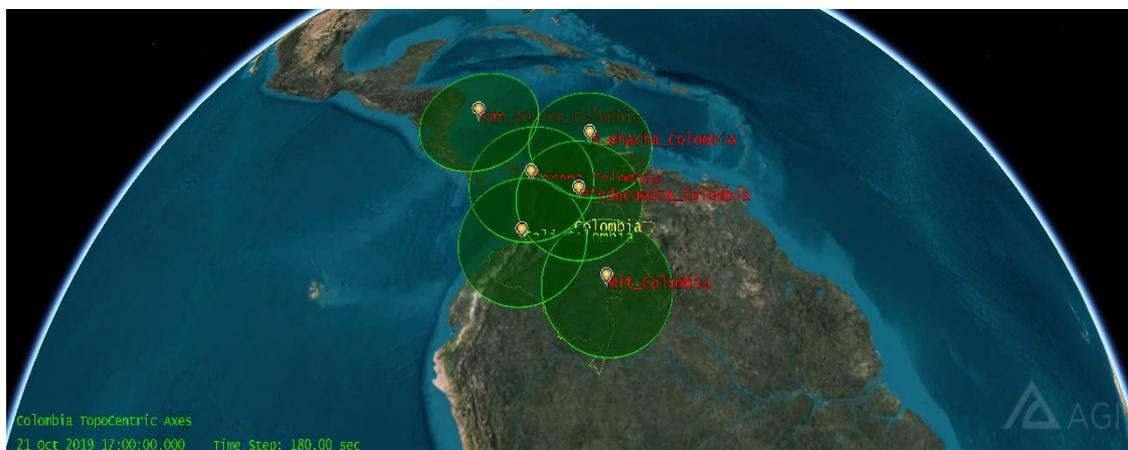


Figura 33. Simulación seis antenas RIMS, STK.

Fuente: Autores.

Posteriormente, STK permite seleccionar constelaciones GPS con disponibilidad en la zona ecuatorial más específicamente Colombia. Para el sistema GNSS es necesario la triangulación de cuatro satélites GPS. En la Figura 34 se observa la triangulación requerida para GNSS y la disponibilidad satelital del segmento espacial del SBAS Colombia.

Espacio intencionalmente dejado en blanco

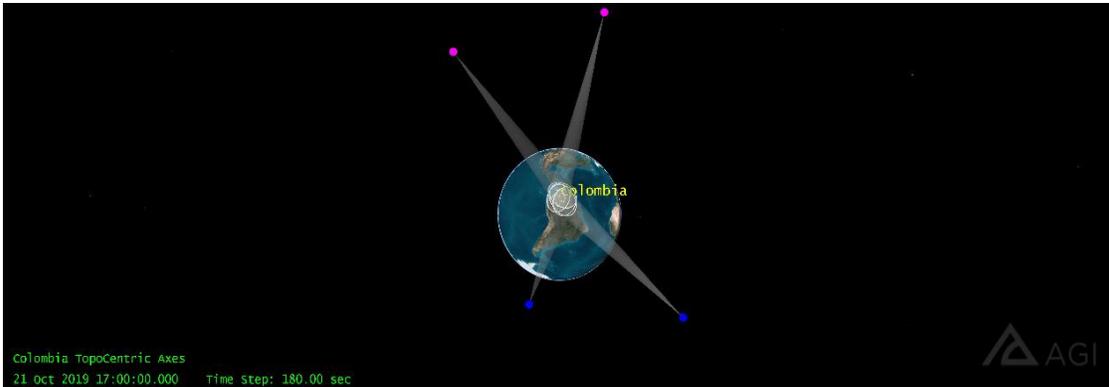


Figura 34. Constelación GPS, STK.

Fuente: Autores.

Como resultado de la simulación en STK se puede determinar en la Figura 35 la arquitectura total del sistema SBAS Colombia. El segmento espacio transmite (Tx) la señal GPS en la zona ecuatorial colombiana. La cobertura de antenas RIMS recibe (Rx) las señales GPS directamente de los satélites GPS la cual cada una de las seis antenas envía la información a la estación maestra ubicada en Bogotá, inmediaciones del Aeropuerto Internacional EIDorado.

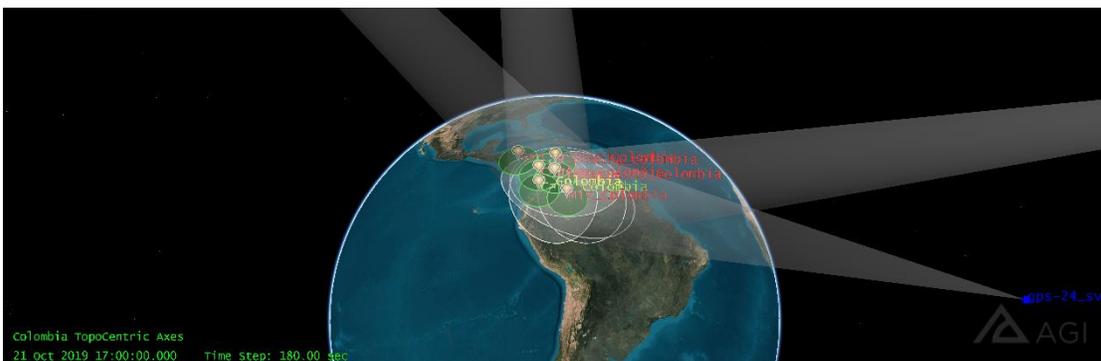


Figura 35. Simulación recepción con antenas RIMS de la señal GPS, STK.

Fuente: Autores.

5.5.5.Arquitectura Comunicación Constelación GPS – Estaciones De Referencia (RIMS)

En la Figura 36 se puede apreciar el esquema o arquitectura de la comunicación entre la antena RIMS emplazada en los límites de la aérea terminal del aeropuerto de la ciudad de Riohacha y la constelación GPS. La Figura 36 esquematiza la triangulación real que sigue la comunicación entre estos dos segmentos del SBAS Colombia y el diseño preliminar de la construcción de la estación de referencia, teniendo en cuenta el *Checklist* “Criterio para el emplazamiento de las estaciones de referencia”, Capítulo 8, fase 2, ítem 8.2.4. y los parámetros de seguridad.

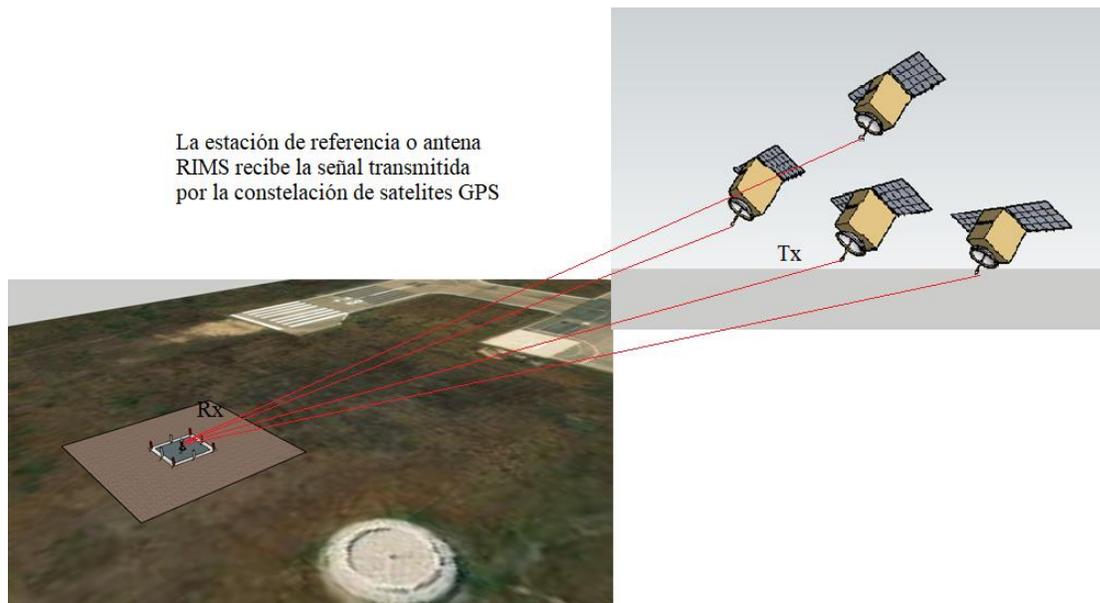


Figura 36. Arquitectura comunicación entre constelación GPS y RIMS.

Fuente: Autores.

Página dejada en blanco intencionalmente.

5.6. FASE 5: COMUNICACIÓN DE ENLACE

5.6.1. Envío de Datos del Sistema de Comunicación

La capa de comunicación del sistema en tierra se hace por medio de la fibra óptica con la finalidad de generar una transferencia de datos rápida y segura. Lo más seguro en la transmisión de datos es la fibra óptica. En Colombia existe esta red de fibra óptica, sin embargo, para el caso específico del segmento terrestre SBAS se debe usar la red de fibra óptica monomodo que cumple con las siguientes características [41]:

- Las fibras monomodo tienen la capacidad de transmitir el mayor ancho de banda posible y son ideales para enlaces de transmisión a largas distancias.
- Las fibras monomodo poseen una atenuación más baja que las fibras multimodo.
- Los cables de fibra monomodo son más económicos que los cables multimodo.
- Se dispone de fibras monomodo para longitudes de onda óptica de 1310 y 1550nm.

La fibra óptica monomodo es de menor diámetro que la fibra multimodo, y está hecha con núcleo de vidrio de 9 μm y capa de revestimiento de 125 μm . (1 μm = 0.000001m = 10^{-6} m) [42].

PROCEDIMIENTO

El siguiente procedimiento fue tomado de “Fundamentos de Diseño de F.O” [41].

- 1 El fabricante proporciona la siguiente información:
 - Recomendaciones de diámetro de la fibra óptica.
 - Atenuación máxima recomendada de la fibra óptica en dB/Km apertura numérica recomendada.
 - Longitud máxima recomendada de la fibra óptica, atenuación máxima especificada para el equipo.

- 2 Del plan de instalación de fibra óptica determinar:
 - La longitud total del enlace de fibra óptica.
 - El número de empalmes requeridos y las pérdidas en cada uno.
 - El número de conexiones de fibra y las pérdidas por cada conexión en margen de diseño.
 - Las pérdidas ópticas debidas a otros posibles componentes del sistema.

- 3 Completar la evaluación de técnica óptica:
 - Atenuación de la fibra óptica a la longitud de onda de trabajo: distancia en kilómetros empleando dB/Km.
 - Pérdida en los empalmes: empalmes a dB/empalmes pérdidas de conexión.
 - Margen de diseño, atenuación total del enlace.
 - Potencia media de salida del transmisor, potencia de entrada al receptor.
 - Rango dinámico del receptor.

5.6.2. Distancia Entre las Estaciones de Referencia y la Estación Maestra

La capa de comunicación terrestre debe garantizar la fiabilidad de transferencia de datos, lo que significa que la red de fibra óptica debe cubrir la distancia entre todas las estaciones de referencia con respecto a la estación maestra. En la Tabla 18 se muestran las distancias de las seis estaciones de referencia y la estación maestra ubicada en el aeropuerto ElDorado. La distancia medida se esquematiza en el trazo de la línea recta de color amarillo.

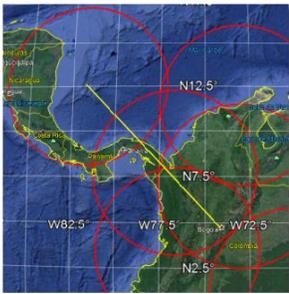
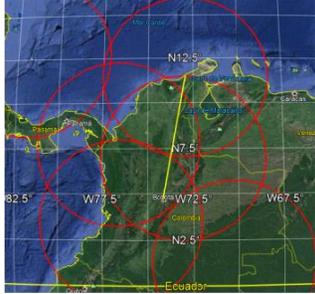
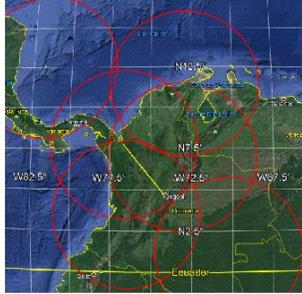
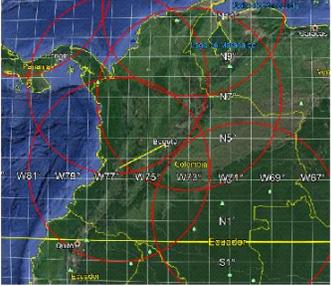
SAN ANDRES - MAESTRA		RIOHACHA-MAESTRA		CAREPA-MAESTRA	
					
DISTANCIA	1,205.67	DISTANCIA	767.46	DISTANCIA	437.96
PIEDRECUESTA-MAESTRA		CALI-MAESTRA		MITU-MAESTRA	
					
DISTANCIA	280.91	DISTANCIA	280.98	DISTANCIA	577.39

Tabla 18. Distancia entre estaciones de referencia y estación maestra.

Fuente: autores

En la Figura 37 se esquematiza en RadioMobile la conectividad entre la estación maestra y las seis estaciones de referencia. Es una conectividad tipo estrella, esto es debido a que la comunicación de cada estación de referencia debe ser enviada directa a la estación maestra y no entre estaciones de referencia.



Figura 37. Conectividad tipo estrella de estaciones de referencia a estación maestra, RadioMobile.
Fuente: autores

5.6.3. Arquitectura Comunicación Estación de Referencia (RIMS) – Estación Maestra

La estación maestra debe contar con una infraestructura capaz de solventar los equipos y requerimientos necesarios para garantizar los procesos de corrección de la señal GPS que se llevan dentro de estas instalaciones. Con el interés de mostrar la infraestructura estandarizada en los otros sistemas SBAS se realizó un diseño en 3D. En la Figura 38 se puede apreciar un CAD el cual fue realizado en SketchUP Pro-2019, el cual muestra una propuesta para remodelar el edificio “Acuario” (Centro de control UAEAC) para, a partir de ahí, ubicar la estación de enlace (antena parabólica) en la azotea. En su defecto, de no ser posible la remodelación, la antena parabólica se puede emplazar en inmediaciones del edificio acuario más específicamente en las coordenadas establecidas para la estación maestra como se puede apreciar en el capítulo 8, ítem 8.2.2, Figura 16 “Emplazamiento detallado de estaciones de referencia y maestra preliminar.



Figura 38. Diseño 3D estación maestra y antena de enlace, SketchUP Pro-2019.

Fuente: Autores.

En la Figura 39 se esquematiza la transmisión de datos a través de la antena RIMS a la estación maestra por medio de red de fibra óptica monomodo. La información que recibe la estación maestra es corregida dentro de las instalaciones, tal que, se efectúan cálculos, comparaciones y análisis mediante algoritmos, en su defecto para correcciones ionosférica, entre otras.

Espacio intencionalmente dejado en blanco



Figura 39. Transmisión de datos desde la estación de referencia (RIMS) a la estación maestra.

Fuente: Autores.

5.6.4. Simulación STK Comunicación Entre Estación de Enlace y Satélite Inmarsat

La estación de enlace (antena parabólica) cumple un papel importante dentro de la infraestructura del segmento terrestre del SBAS Colombia. Para ello, por medio de SketchUP Pro-2019 se realizó un diseño 3D con el interés de reconocer las propiedades de esta. En la Figura 40 se aprecia el resultado de la elaboración de esta antena la cual estará en las inmediaciones del centro de control UAEAC. Cabe resaltar, de no ser posible la construcción de la estación maestra, se presenta como medio de solución este diseño 3D.

Espacio intencionalmente dejado en blanco

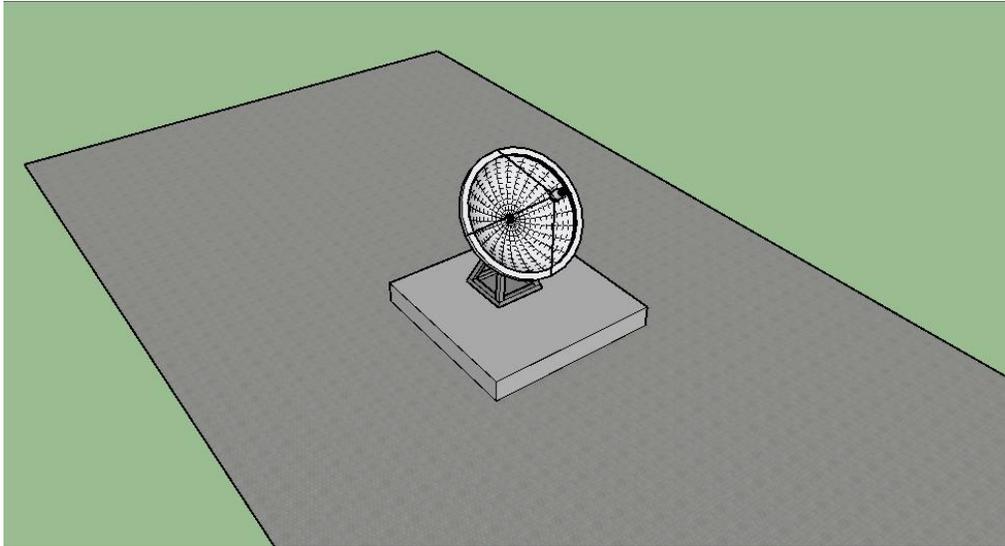


Figura 40. Diseño estación de enlace (antena parabólica). SketchUP Pro-2019.

Fuente: Autores.

Conforme a las coordenadas determinadas para el posicionamiento de la estación de enlace, se ubica en STK la estación de enlace como se puede apreciar en la Figura 41. Con el interés de simular la señal de subida proveniente de la estación de enlace hacia el satélite SBAS se simula por medio de una sonda la transmisión de los datos hacia el satélite. Esta señal de subida transmite el mensaje SBAS codificado en banda C para posteriormente ser transmitido por el satélite SBAS.



Figura 41. Simulación de la transmisión de datos ascendente desde la estación de enlace.

Fuente: Autores.

Con los datos extraídos por medio del seguimiento de los satélites Inmarsat se determinaron las características/elementos orbitales para, a partir de ahí, simular por medio del programa STK el enlace de bajada transmitida a el segmento usuario. Lo anterior se puede apreciar en la Figura 42.



Figura 42. Simulación de la transmisión de datos descendente desde satélite órbita GEO.

Fuente: Autores.

En la Figura 43 se pueden apreciar los resultados de la simulación hecha en STK. El mensaje SBAS el cual es transmitido por la estación de enlace se representa en color azul y, la señal de baja en color blanco, la cual es captada por el equipo ABAS instalada dentro de las aeronaves.

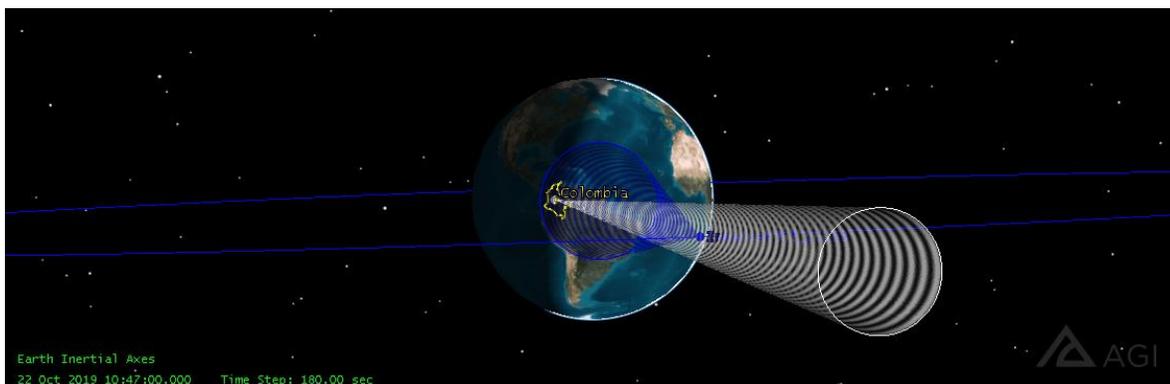


Figura 43. Simulación de la transmisión de datos ascendente y descendente.

Fuente: Autores.

Capítulo 6

Resultados y Discusión

6.1. Resultados

La fase 1 - Determinación de Sectores de Navegación Aérea en Colombia. Se evaluaron los siguientes ítems (Tabla 19):

DETERMINACIÓN DE SECTORES DE NAVEGACIÓN AÉREA EN COLOMBIA			
FASE 1	1	FLIGHT RADAR 24; RECOPIACIÓN DE DATOS	X
	2	PLOTTER, MAPA RNAV 5.	X
	3	PLAN DE VUELO TEÓRICO, SKY VECTOR	X
	4	MAPA SKY VECTOR Y MAPA PNA COL	X

Tabla 19. Ítems fase 1

Fuente: Autores

El desarrollo de la fase 1, dejó como resultado general las 10 posibles posiciones de las antenas RIMS como se aprecia en la tabla 8, “Servicios a la Navegación Disponibles”. Esto se logró por medio del mapeo de las rutas aéreas que sobrevuelan Colombia. En la carta de navegación RNAV5, puede ser visualizada en el anexo 1 y los datos de coordenadas de las rutas aéreas evaluadas se puede ser en el capítulo “toma de datos” de la fase 1.

Como resultado secundario, se observaron las discrepancias entre las rutas de navegación teóricas que trazan los operadores, y la trayectoria que realmente toma la aeronave. La variación se debe al radio de cobertura que tienen las radioayudas. También se pudo observar que los operadores buscan la mejor forma de navegación según su criterio, lo que significa que las aerovías pueden ser variadas en torno a la necesidad. De lo que se puede inferir que al haber mayor cobertura del espacio aéreo, se podrían generar rutas aéreas más directas, lo que disminuye el tiempo de vuelo y los costos que conlleva.

La fase 2 – Criterios de Ubicación de Antenas. Se evaluaron los siguientes ítems (tabla 20):

CRITERIO DE UBICACIÓN DE ANTENAS			
FASE 2	1	CRITERIO Y/O RECOMENDACIONES OACI / FAA	x
	2	POSIBLE UBICACIÓN ANTENAS COLOMBIA	x
	3	ZONAS DE ESTACIONES DE REFERENCIA, DETALLADO	x
	4	INGENIERÍA INVERSA (SBAS COLOMBIANO VS GAGAN), RADIO MOBILE Y SKY VECTOR	X
	5	CHECK LIST, CRITERIOS (SEIS ESTACIONES)	X

Tabla 20. Ítems fase 2

Fuente: Autores

La fase 2 fue la más importante, debido a que se generó la infraestructura necesaria para las simulaciones del sistema SBAS colombiano, de la arquitectura terrestre que se debe emplazar en Colombia.

Tomando en cuenta los criterios y recomendaciones de FAA, se generó un estudio de los sistemas SBAS implementados en el mundo. Esto llevó a desglosar el sistema de la India GAGAN debido a las condiciones geográficas similares a las de Colombia. Por medio de la ingeniería inversa se determinó la cobertura de todo el sistema GAGAN, las ubicaciones de las antenas RIMS, y la asimilación de una perturbación ionosférica similar de toda la zona ecuatorial. Se llegó a la conclusión de reducir las 10 posibles posiciones de emplazamiento de la tabla 8, a solo seis posiciones para las antenas RIMS en Colombia. Estas seis posiciones estratégicas, cumplen con todos los criterios recomendados por FAA, y generan la cobertura de todo el territorio nacional, de manera similar a la cobertura que genera en India el sistema GAGAN.

Por último en un *CheckList*, se evaluaron las “actividades de inspección” de las seis ubicaciones para antenas RIMS. Se dividió en cinco puntos, los cuales deben cumplirse en más del 50% de ellos para ser viable la implementación.

De la fase 2 se puede concluir que:

- La implementación de un segmento terrestre de un sistema SBAS colombiano es viable;
- El espacio aéreo colombiano es de vital importancia para la región, por la conectividad del continente;
- El único criterio con el que no cuenta Colombia es un estudio ionosférico.

La fase 3 – RadioMobile Zonas CAR/SAM – COL. Se evaluaron los siguientes ítems (tabla 21):

RADIOMOBILE ZONAS CAR/SAM-COL			
FASE 3	1	TRES MAPAS (CAR/CENTRO/SAM)	X
	2	SISTEMA COMPLETO	X
	3	DETALLES ESPECÍFICOS, ESTACIONES DE REFERENCIA	X

Tabla 21. Ítems fase 3

Fuente: Autores

La fase 3 es la simulación en RadioMobile de cobertura de las regiones en Colombia. Según las zonas OACI Colombia pertenece a dos, las cuales son CAR (caribe), y SAM (sur América). Para un mejor entendimiento del estudio, se dividió el espacio aéreo colombiano en 3 zonas: CAR, SAM-CENTRO y SAM-SUR. Dos antenas RIMS ubicadas en la isla caribeña de San Andrés, y la región continental del caribe Riohacha, dan la cobertura a la zona OACI CAR de Colombia. Una tercera antena ubicada en Carepa genera una cobertura que une las dos antenas RIMS de la zona CAR y une el centro-occidente del país, el cual se denomina SAM-CENTRO.

La antena RIMS ubicada en Piedecuesta genera la cobertura al centro-oriente del país. Esta antena RIMS une la zona SAM-CENTRO con CAR y SAM-SUR.

Por último, dos antenas RIMS ubicadas en Cali y Mitú. Estas dos antenas dan cobertura a la zona SAM-SUR de Colombia.

En la figura 27 de la fase 3 se observa la cobertura total que generan las seis antenas RIMS. De la fase 3 se puede concluir que bajo los criterios recomendados por FAA se puede generar la cobertura del segmento terrestre del sistema SBAS en Colombia con solo seis antenas RIMS.

La fase 4 – Estación Maestra. Se evaluaron los siguientes ítems (tabla 22):

ESTACIÓN MAESTRA			
FASE 4	1	IONOSFERA	X
	2	DISPONIBILIDAD SATÉLITES GPS (DOCUMENTO SACCSA BOLETÍN 3)	X
	3	DATOS A SATÉLITE INMARSAT	X
	4	SIMULACIÓN STK (RECEPCIÓN SEÑAL GPS ER)	x
	5	ARQUITECTURA DE LA RECEPCIÓN DE SEÑAL GPS	X

Tabla 22. Ítems fase 4

Fuente: Autores

La fase 4 se enfocó en el desglose de las funciones de la estación maestra y la simulación de recepción de antenas RIMS para la señal GPS.

La finalidad de los sistemas de aumentación es corregir error de posicionamiento de las señales satelitales. El trabajo de la estación maestra es la corrección de la señal y enviar la señal a la estación de enlace para ser codificada y enviada a los satélites.

El mayor error es producido por la ionosfera, por esta razón el primer ítem de esta fase se enfocó en el estudio y causas de la ionosfera. Se tomó como base el estudio ionosférico de SACCSA y una extracción de los datos de ciclos solares de los años del estudio, y se comparó los ciclos solares con los años posteriores al estudio. Se obtuvo como conclusión que para hacer la simulación de recepción se puede tomar el número máximo de interferencia, el cual fue 26 metros de error vertical.

Para el ítem 2, “disponibilidad de satélites”, se tomó como base los satélites GEO Inmarsat. Con el programa Orbitron se realizó un seguimiento de estos satélites para recopilar los datos de órbita, y tomarlos como guía para una simulación de recepción de señal de las antenas RIMS en el programa STK.

Con los datos de error ionosférico, los datos de órbita de satélites y el emplazamiento de las antenas RIMS en el territorio colombiano, se hizo una simulación en el software STK como se observa en la Figura 35, “Simulación con Antenas RIMS de la Señal GPS”, capítulo 8, ítem 8.4.4. se usaron cuatro satélites como es necesario para los sistemas GNSS. Como conclusión se pudo demostrar por medio de las simulaciones STK que el sistema SBAS Colombia cumple con todos los requerimientos establecidos por la OACI los cuales son: Precisión, Disponibilidad, Integridad y Continuidad.

La fase 5 – Comunicación de enlace. Se evaluaron los siguientes ítems (tabla 23):

COMUNICACIÓN DE ENLACE			
FASE 5	1	DESCRIPCIÓN FIBRA ÓPTICA	X
	2	ARQUITECTURA DE ENLACES	X
	3	COMUNICACIÓN TIERRA SATÉLITE	X

Tabla 23. Ítems fase 5

Fuente: Autores

En la fase 5 se hicieron las simulaciones de los todos los enlaces de comunicación del sistema SBAS. La comunicación entre antenas en tierra se hace en fibra óptica, más específicamente con una red de fibra óptica monomodo.

La comunicación tierra satélite se genera con una estación de enlace con antena parabólica como se esquematiza en la Figura 40 “Diseño de Estación de Enlace”, y la simulación del enlace ascendente se esquematiza en la Figura 43 “Simulación de la Transmisión de Datos ascendente y Descendente”.

Los satélites tipo SBAS transmiten la señal ya corregida a las aeronaves que cuentan con el sistema ABAS instalado, y a la estación de enlace. La estación de enlace verifica la señal que transmite el satélite tipo SBAS para hacer un monitoreo de la efectividad del sistema. De los resultados de las cuatro fases anteriores, se determinaron los datos para una simulación de transmisión de señal corregida, de un satélite tipo SBAS a la estación terrena. De la fase 5 se puede concluir que:

- La comunicación por medio de fibra óptica entre los segmentos terrestres del sistema SBAS es viable para la implementación en Colombia;
- El enlace ascendente es posible, pero no existe una antena de comunicación directa con los satélites SBAS en Colombia;
- Colombia no cuenta con satélites de comunicación, lo que deja el segmento espacio en contratación de terceros.

6.1 Discusión

Para que el sistema SBAS Colombia sea posible, hay que tener en cuenta que este proyecto se basó en el emplazamiento de las antenas del segmento terrestre, y las simulaciones sirvieron de complemento para demostrar la viabilidad de un sistema SBAS. No obstante, para que sea operativo un sistema tipo SBAS se debe realizar un estudio de la anomalía ionosférica, a su vez, se debe contar con una red de satélites de navegación ya sea propios o contratados a terceros. Lo que significa que la implementación total de un sistema tipo SBAS en Colombia se debe enfocar en un proyecto a largo plazo, si se cuenta con el apoyo y financiación de las autoridades aeronáuticas del país, se podría iniciar el estudio con la finalidad de tener un sistema SBAS operativo en la próxima década y estar a la vanguardia en materia tecnología de navegación en Latinoamérica. Siendo Colombia el precursor de estos sistemas en la región, porque el objetivo de la OACI es que todas las regiones aéreas del mundo cuenten con sistemas de aumentación satelital.

Página dejada en blanco intencionalmente.

Capítulo 7

Conclusiones y Recomendaciones

Este proyecto de grado realiza una primera aproximación, desde la Fundación Universitaria Los Libertadores, al diseño de un sistema de aumentación SBAS que puede ser emplazado para ser utilizado para apoyar las tareas de navegación en Colombia. Por lo anterior, se presenta como se describe en el objetivo general un estudio técnico para establecer la viabilidad del emplazamiento para la implementación del segmento terrestre del sistema SBAS como sistema primario en fase de vuelo crucero en el territorio colombiano, descrito en detalle en el Capítulo 5. Se destaca que este proyecto es beneficioso tanto para la UAEAC como para aquellos que necesiten desarrollar nuevos estudios para la implementación de SBAS, ya que establece un análisis detallado para el emplazamiento del segmento terrestre como se detalla en las cinco fases de desarrollo.

Tomando como base las estadísticas de los boletines operacionales de la UAEAC se identificaron las principales rutas aéreas, tanto nacional como internacional que sobrevuelan el país (véase las Gráficas 2 y 3), y el seguimiento de las aeronaves que sobrevuelan Colombia (véase Anexo 1), se reconocieron los diferentes sectores de tránsito aéreo del territorio colombiano dando cumplimiento al objetivo de Identificar las necesidades de espacio de cobertura de las principales cinco rutas aéreas de Colombia, presentado en el Capítulo 5, sección 5.1.

Con el reconocimiento de los sectores aéreos, se determinó la cantidad de antenas de referencia (véase Tabla 9) y cada antena de referencia se evaluó con los criterios FAA (véase Tablas de 10 a 15). Las antenas de referencia generan la cobertura de recepción necesaria para todo el territorio colombiano (véase Figura 27). La estación maestra y de enlace se diseñó y se determinó en una sola ubicación (véase Figura 38) presentado en el Capítulo 5, sección 5.3.

Se simuló la cobertura de recepción para todo Colombia del segmento terrestre de las señales GPS (véase Figura 35), se simuló la transmisión de datos descendente y

ascendente (véase Figura 43). De las simulaciones de cobertura se concluyó que el segmento terrestre de un sistema SBAS es viable para la cobertura de las regiones CAR y SAM de Colombia, presentado en el Capítulo 5, sección 5.6.

7.2 Recomendaciones

El segmento terrestre se concluyó con éxito, la cobertura del territorio colombiano se logró con seis antenas de referencia, una estación maestra y una estación de enlace. Con la finalidad de un sistema SBAS operativo en Colombia se debe tomar este proyecto como punto de partida para los estudios de los diferentes segmentos del sistema. Para ello se pueden destacar las siguientes recomendaciones:

- Antes de cualquier implementación de los segmento SBAS se debe realizar un estudio de las anomalías de la ionosfera, debido a que es el factor determinante en el error de las señales de posicionamiento. Se debe tener en cuenta que Colombia está posicionada en la zona ecuatorial, y por ello la anomalía es mayor. No se puede tomar como referencia un estudio ionosférico fuera de la zona ecuatorial.
- Teniendo en cuenta que la base del sistema SBAS es la disponibilidad satelital, Colombia debe usar las constelaciones satelitales que están operativas en el 2019, con la finalidad de que el sistema SBAS de Colombia pudiese estar operativo en las próximas 2 décadas.
- Para continuar con el estudio de implementación se debe generar un algoritmo para la corrección de las señales satelitales, que tenga en cuenta los parámetros expuestos este documento, como son: ionosfera, ciclos solares, climatología, entre otros.

Página dejada en blanco intencionalmente.

Bibliografía

- [1] V. Gatica, “Monitoreo Gns para México ”,” p. 137, 2012.
- [2] S. Cavero, “Trabajo Final de Grado,” *Sergioguillen.Com*, no. 710, pp. 1–119, 2014.
- [3] “Boletines Operacionales.” [Online]. Available: <http://www.aerocivil.gov.co/atencion/estadisticas-de-las-actividades-aeronauticas/boletines-operacionales>. [Accessed: 25-Mar-2019].
- [4] “En 10 años, Colombia duplicó su conexión aérea con el mundo | Negocios | Portafolio.” [Online]. Available: <https://www.portafolio.co/negocios/en-10-anos-colombia-duplico-su-conexion-aerea-con-el-mundo-514765>. [Accessed: 24-Mar-2019].
- [5] “¿Por qué el aeropuerto El Dorado está colapsado?” [Online]. Available: <https://www.semana.com/economia/articulo/por-que-el-aeropuerto-el-dorado-esta-colapsado/632691>. [Accessed: 07-Oct-2019].
- [6] “Las nuevas rutas aéreas internacionales en Colombia - Empresas - Economía - EL TIEMPO.COM.” [Online]. Available: <https://www.eltiempo.com/economia/empresas/las-nuevas-rutas-aereas-internacionales-en-colombia-302408>. [Accessed: 07-Oct-2019].
- [7] C. Y. Eficiencia, “Plan mundial de navegación aérea 2016-2030 CAPACIDAD Y EFICIENCIA,” 2018.
- [8] “Plan de Navegación Aérea para Colombia- PNA COL.” [Online]. Available: <http://www.aerocivil.gov.co/servicios-a-la-navegacion/planes-de-navegacion-aerea-para-colombia>. [Accessed: 24-Mar-2019].
- [9] “RESOLUCIÓN 2500 DE JUNIO 28 DE 2004 - RESOLUCIÓN 2500 DE 2004.” [Online]. Available: <http://legal.legis.com.co/document/index?obra=legcol&bookmark=bf175bc540ee45a4c399e9f9881f9d64c13nf9>. [Accessed: 24-Mar-2019].
- [10] Aeronáutica Civil, “Plan de Navegación Aérea para Colombia Volumen II. Instalaciones y Servicios,” 2017.
- [11] “What is GNSS? | European Global Navigation Satellite Systems Agency.” [Online]. Available: <https://www.gsa.europa.eu/european-gnss/what-gnss>. [Accessed: 24-Mar-2019].
- [12] M. Del, C. Furquet Gascón, and P. Yuste Pérez, “Trabajo Fin de Grado Estudio y análisis de la certificación y diseño de un SBAS (Satellite Based Augmentation System) para aeropuertos/heliódromos,” 2016.
- [13] G. S. Granados, “Evolución de la navegación por satélite : Galileo y sistemas híbridos.”
- [14] Z. R. Vargas Cordero, “La Investigación aplicada: Una forma de conocer las realidades con evidencia científica,” *Rev. Educ.*, vol. 33, no. 1, p. 155, 2009.
- [15] *metodologia-de-la-investigacion-sexta-edicion.compressed.pdf - Lumin Pdf.* .
- [16] P. Primera, D. Y. Clases, and D. E. N. Aerea, “Capítulo Primero - Navegación Aérea,” pp. 1–45.
- [17] *Aircraft Communications and Navigation Systems.pdf - Lumin Pdf.* .
- [18] “What is GNSS? | European Global Navigation Satellite Systems Agency.” [Online]. Available: <https://www.gsa.europa.eu/european-gnss/what-gnss>.

- [Accessed: 24-Mar-2019].
- [19] V. Gatica, “Monitoreo Gns para México”, p. 137, 2012.
- [20] “What is Galileo? / Galileo / Navigation / Our Activities / ESA.”
- [21] A. Pozo-Ruz, A. Ribeiro, M. C. García-Alegre, L. García, D. Guinea, and F. Sandoval, “Sistema De Posicionamiento Global (Gps): Descripción, Análisis De Errores, Aplicaciones Y Futuro,” ETS Ing. Telecomunicaciones. Univ. Malaga, p. 174, 2000.
- [22] S. Cavero, “Trabajo Final de Grado,” *Sergioguillen.Com*, no. 710, pp. 1–119, 2014.
- [23] U. Avionics, “Operating in Satellite-Based Augmentation System (SBAS) Airspace,” no. October, 2013.
- [24] E. D. Kaplan and C. (Christopher J. . Hegarty, *Understanding GPS : principles and applications*. Artech House, 2006.
- [25] J. Acac, I. Mid, W. On, and G. Rabat, “Egnos service provision,” pp. 1–26, 2017.
- [26] “GAGAN — India’s SBAS - Inside GNSS.”
- [27] Augmentation, “India’s Satellite-Based Augmentation System GAGAN — Redefining Navigation over the Indian Region,” *InsideGNSS*, pp. 42–48, 2016.
- [28] “SACCSA Análisis Topología 2 (PT N° 2220),” vol. 2, 2007.
- [29] D. Brocard, T. Maier, and C. Busquet, “EGNOS Ranging and Integrity Monitoring Stations (RIMS),” *Proc. GNSS 2000 Conf.*, no. 1, pp. 1–13, 2000.
- [30] “SACCSA-RCC9.” [Online]. Available: https://www.icao.int/SAM/Pages/ES/SACCSA-RCC9_ES.aspx. [Accessed: 22-Oct-2019].
- [31] P. Rla, P. Sacca, O. Bolet, and S. No, “Solución de Aumentación para el Caribe , Centro y Sudamérica SEÑAL DE PRUEBA SBAS /,” 2010.
- [32] “Placement of WAAS Reference Station (WRS) for Indian airspace - Geospatial World.” [Online]. Available: <https://www.geospatialworld.net/article/placement-of-waas-reference-station-wrs-for-indian-airspace/>. [Accessed: 27-Oct-2019].
- [33] F. I. I. I. Sacca, “PT N°2220 Generación de Escenarios IET y Soporte.”
- [34] “Sistemas gnss 26,” pp. 26–35.
- [35] P. Transportu, “ANALYSIS OF THE EGNOS / GNSS PARAMETERS IN SELECTED ASPECTS ANALIZA PARAMETRÓW SYSTEMU EGNOS / GNSS W WYBRANYCH,” vol. 4, no. 9, 2014.
- [36] A. W. Lyon, J. Westbrook, and U. Guida, “Operating EGNOS,” 2003.
- [37] S. Cavero, “Trabajo Final de Grado,” *Sergioguillen.Com*, no. 710, pp. 1–119, 2014.
- [38] M. Cueto, A. Cezón, S. Pineda, and E. Sardon, “Ionospheric analysis in the equatorial region: Impact on GNSS performances,” *20th Int. Tech. Meet. Satell. Div. Inst. Navig. 2007 ION GNSS 2007*, vol. 2, pp. 2324–2336, 2007.
- [39] L. R. Cander, *Ionospheric space weather*. .
- [40] Inmarsat, “I-3 to I-4 services migration - Inmarsat.” [Online]. Available: <https://www.inmarsat.com/support/i-3-to-i-4-services-migration/>. [Accessed: 04-Nov-2019].

Página dejada en blanco intencionalmente.

Apéndice A

Primer Apéndice:

Anexo 1 - Carta de navegación RNAV 5 (Plóter)

ESPACIO INTENCIONALMENTE DEJADO EN BLANCO

Apéndice B

Segundo Apéndice

Datos rutas nacionales e internacionales:

ID	RUTA	COORDENADAS
1R	BOG - SMR	05 01 05 N 073 59 12 W
		05 31 56 N 073 51 31 W
		06 28 52 N 073 39 46 W
		06 53 02 N 073 05 31 W
		06 58 41 N 073 33 38 W
		08 11 46 N 073 37 08 W
		09 02 43 N 073 58 02 W
		09 25 25 N 073 54 17 W
		10 40 50 N 074 06 44 W
		10 42 26 N 074 20 19 W
		10 57 45 N 074 14 26 W
		11 07 10 N 074 13 50 W
2R	BOG - CLO	04 50 48 N 073 11 04 W
		04 36 11 N 074 16 23 W
		04 11 30 N 074 51 57 W
		03 52 07 N 075 29 48 W
		03 24 07 N 076 24 20 W
		03 32 35 N 076 22 53 W
3R	CLO - BGO	04 05 24 N 076 13 25 W
		04 27 10 N 076 27 49 W
		04 47 02 N 074 46 03 W
		04 36 11 N 074 16 23 W
		04 70 14 N 074 14 45 W
4R	BOG - TCO	04 61 14 N 074 28 50 W
		04 49 76 N 074 48 70 W
		04 43 13 N 074 61 40 W
		04 35 76 N 074 76 75 W
		04 30 55 N 074 86 18 W
		04 21 25 N 075 03 90 W
		04 08 70 N 075 20 00 W
		03 94 50 N 075 40 70 W
		03 67 80 N 075 87 39 W
		03 62 42 N 076 15 18 W
		03 31 25 N 076 47 80 W
		02 90 31 N 076 85 70 W
02 29 51 N 078 03 54 W		

5R	BOG - MDE	04 07 49 N 074 86 51 W
		04 46 76 N 074 88 23 W
		05 49 31 N 074 98 34 W
		06 51 60 N 075 09 71 W
6R	BOG - CTG	05 49 31 N 074 98 34 W
		06 51 60 N 075 09 71 W
		07 13 52 N 075 16 53 W
		08 12 40 N 075 27 79 W
		08 81 21 N 075 35 46 W
		09 34 20 N 075 41 49 W
7R	BOG - BAQ	04 03 10 N 074 16 20 W
		05 10 90 N 073 96 20 W
		05 94 00 N 073 77 34 W
		06 40 29 N 073 63 81 W
		07 23 28 N 073 78 60 W
		08 05 28 N 074 24 43 W
8R	BOG - BGA	05 33 84 N 073 90 28 W
		06 21 59 N 073 71 41 W
		07 05 80 N 073 63 78 W
		07 41 43 N 073 84 10 W
		07 91 53 N 074 26 69 W
9R	BOG - ADZ	05 15 75 N 074 61 75 W
		05 26 82 N 074 86 89 W
		05 91 69 N 075 21 21 W
		06 37 40 N 075 40 50 W
		06 99 56 N 075 77 49 W
		07 21 20 N 076 37 90 W
		08 10 51 N 077 12 60 W
		09 88 48 N 078 75 68 W
		10 90 34 N 079 78 65 W
		11 58 81 N 080 47 67 W

Tabla 1. Datos experimentales, coordenadas rutas nacionales.

Fuente: Autores.

ID	RUTA	COORDENADAS
1I	BOG - LAX	04 59 15 N 074 29 03 W
		04 72 15 N 074 57 31 W
		04 97 64 N 074 81 98 W
		05 17 90 N 075 21 61 W
		05 50 51 N 075 49 80 W
		06 19 34 N 076 08 69 W
		06 78 01 N 076 57 17 W
		07 00 29 N 076 78 43 W
		07 47 44 N 077 18 17 W
		07 72 28 N 077 45 85 W
		08 18 38 N 078 23 99 W
		08 43 14 N 078 65 52 W
		2I
08 11 41 N 073 61 62 W		
08 99 75 N 073 57 30 W		
09 50 68 N 073 55 94 W		
09 87 24 N 073 53 12 W		
10 35 43 N 073 50 63 W		
10 51 80 N 073 49 58 W		
11 18 52 N 073 46 74 W		
11 35 51 N 073 45 91 W		
11 46 93 N 073 45 34 W		
3I	LIM - PUJ	09 18 49 N 073 60 64 W
		09 69 07 N 073 57 73 W
		10 75 19 N 073 44 34 W
		11 09 84 N 073 27 36 W
		11 53 45 N 073 05 33 W
		11 95 72 N 072 82 98 W
4I	VVI - PTY	00 96 18 S 073 63 30 W
		00 12 99 S 074 08 29 W
		00 86 11 N 074 82 83 W
		01 77 27 075 36 02 W
		02 73 35 N 075 93 92 W
		03 37 55 N 076 31 91 W
		04 32 08 N 076 67 04 W
		05 07 85 N 077 19 16 W
		05 65 53 N 077 59 32 W

51	GIG - PTY	00 68 78 S 069 67 20 W
		01 20 76 N 070 23 84 W
		01 93 01 N 071 05 93 W
		02 31 96 N 071 50 15 W
		03 63 59 N 073 41 41 W
		04 23 23 N 074 40 29 W
		04 56 69 N 074 75 32 W
		05 20 46 N 075 51 92 W
		05 59 05 N 075 90 86 W
		06 08 09 N 076 40 47 W
		06 43 68 N 076 76 58 W
		07 47 69 N 077 55 95 W
		07 58 25 077 58 33 W
		08 13 22 N 077 77 88 W
		08 25 30 N 077 92 34 W
61	LIM - BOG	00 28 18 S 074 77 33 W
		00 74 85 N 074 73 82 W
		01 81 92 N 074 77 68 W
		03 34 31 N 074 79 87 W
		04 02 84 N 074 85 91 W
		04 52 06 N 074 82 25 W
		04 89 45 N 074 78 12 W
		04 94 33 N 074 59 07 W
		04 70 14 N 074 14 45 W
71	LIM - CTG	01 47 22 N 074 79 59 W
		02 14 43 W 074 70 08 W
		02 56 95 N 074 80 19 W
		03 66 15 N 074 86 36 W
		04 07 49 N 074 86 51 W
		04 46 76 N 074 88 23 W
		05 49 31 N 074 98 34 W
		06 51 60 N 075 09 71 W
		07 13 52 N 075 16 53 W
		08 12 40 N 075 27 79 W
		08 81 21 N 075 35 46 W
		09 34 20 N 075 41 49 W

8I	BOG - FLL	05 33 84 N 073 90 28 W
		06 21 59 N 073 71 41 W
		07 05 80 N 073 63 78 W
		07 41 43 N 073 84 10 W
		07 91 53 N 074 26 69 W
		08 45 12 N 074 68 67 W
		09 11 64 N 075 02 53 W
		10 34 34 N 075 54 40 W
9I	BOG - CUN	04 60 05 N 074 33 20 W
		04 79 59 N 074 62 51 W
		05 22 23 N 075 25 40 W
		05 43 15 W 075 84 10 W
		06 66 45 N 076 47 91 W
		07 67 50 N 077 34 37 W
10I	AMS - LIM	04 09 19 N 067 99 28 W
		03 27 96 N 068 47 70 W
		01 90 49 N 069 74 44 W
		00 85 71 N 070 40 59 W
		00 04 14 N 070 83 96 W
		01 64 10 S 071 73 43 W
		02 30 72 S 072 06 66 W
11I	ADZ - BOG	11 58 81 N 080 47 67 W
		10 90 34 N 079 78 65 W
		09 88 48 N 078 75 68 W
		08 10 51 N 077 12 60 W
		07 21 20 N 076 37 90 W
		06 99 56 N 075 77 49 W
		06 37 40 N 075 40 50 W
		05 91 69 N 075 21 21 W
		05 26 82 N 074 86 89 W
		05 15 75 N 074 61 75 W
12I	MEX - BOG	06 70 60 N 077 64 73 W
		05 82 06 N 076 58 57 W
		05 12 74 N 075 47 28 W
		04 88 40 N 074 54 40 W
13I	BOG - MAD	05 84 12 N 073 59 98 W
		06 22 91 N 073 38 19 W
		06 86 19 W 073 05 25 W
		07 40 94 N 072 77 98 W
		07 93 41 N 072 51 35 W
		08 10 48 N 072 36 60 W
		08 31 48 N 072 24 32 W
14I	MIA - LIM	09 74 84 N 076 76 37 W
		08 30 62 N 076 84 28 W
		06 21 13 N 077 13 31 W
		03 84 29 N 077 46 17 W
		02 58 37 N 077 61 53 W

		01 71 07 N 077 62 28 W
		00 24 01 N 077 60 03 W
15I	PTY - EZE	06 36 44 N 078 13 38 W
		05 90 00 N 077 86 60 W
		05 38 00 N 077 56 20 W
		04 96 80 N 077 27 60 W
		04 71 60 N 077 12 20 W
		04 29 50 N 076 92 20 W
		03 94 80 N 076 79 00 W
		03 50 70 N 076 43 50 W
		02 82 53 N 075 98 50 W
		02 33 35 N 075 69 60 W
		01 61 80 N 075 31 08 W
		00 92 22 N 074 84 10 W
		00 09 43 S 074 26 15 W
		01 15 47 S 073 83 40 W
		16I
05 10 90 N 073 96 20 W		
05 94 00 N 073 77 34 W		
06 40 29 N 073 63 81 W		
07 23 28 N 073 78 60 W		
08 05 28 N 074 24 43 W		
10 10 35 N 075 06 14 W		
10 59 70 N 075 22 80 W		
17I	MDE - MIA	06 17 70 N 075 32 40 W
		06 71 80 N 075 37 00 W
		07 09 20 N 075 79 86 W
		07 52 00 N 075 43 60 W
		07 90 20 N 075 49 80 W
		08 47 20 N 075 54 10 W
		08 89 20 N 075 62 64 W
		09 68 34 N 075 75 55 W

18I	MAD - BOG	11 77 68 N 072 45 13 W
		10 59 39 N 073 12 49 W
		09 88 14 N 073 34 25 W
		08 46 00 N 073 40 83 W
		07 60 57 N 073 69 76 W
		06 15 00 N 074 16 90 W
		05 44 20 N 074 21 30 W
		05 22 10 N 074 52 90 W
19I	MEX - BOG	12 36 57 N 081 10 96 W
		11 90 00 N 079 89 00 W
		11 12 74 N 079 25 79 W
		10 79 80 N 077 81 71 W
		10 08 21 N 077 35 61 W
		08 61 80 N 076 44 69 W
		07 61 20 N 075 82 40 W
		06 27 96 N 074 99 64 W
		05 81 07 N 074 88 74 W
		05 22 17 N 074 79 68 W
04 93 08 N 074 42 81 W		
20I	GYE - BOG	00 82 98 N 077 84 86 W
		01 90 12 N 076 91 56 W
		03 40 41 N 075 56 86 W
		04 10 62 N 074 94 71 W
		04 91 28 N 074 48 06 W
21I	MAO - BOG	01 69 24 N 069 74 91 W
		02 07 76 N 070 36 45 W
		02 58 55 N 071 14 73 W
		02 88 46 S 073 58 44 W
		03 93 03 N 073 19 00 W
		04 26 13 N 073 79 90 W
		04 23 80 N 074 25 47 W
22I	MVD - PTY	02 62 50 S 072 62 69 W
		01 69 71 S 073 13 05 W
		00 41 79 S 074 41 09 W
		00 90 67 N 074 97 24 W
		01 61 77 N 075 19 95 W
		01 80 29 N 075 24 70 W
		02 41 43 N 075 50 84 W
		03 36 19 N 076 12 96 W
		03 89 18 N 076 67 62 W
		04 55 83 N 077 34 78 W

Tabla 2. Datos experimentales, coordinadas rutas internacionales.

Fuente: Autores.

Apéndice C

Tercer Apéndice

Planes de vuelo teóricos SkyVector:

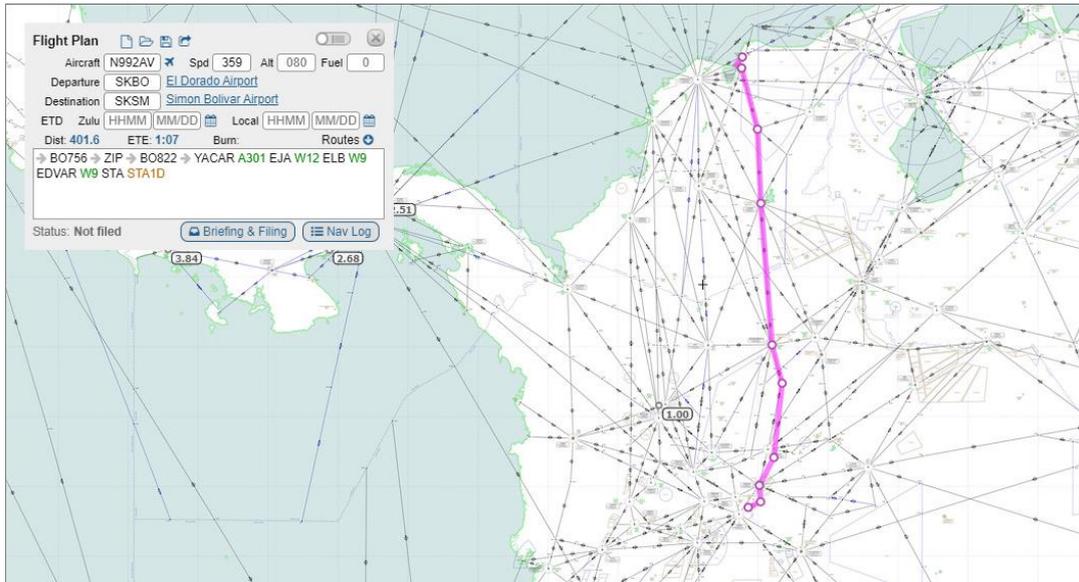


Figura 1. Plan de vuelo teórico ruta IR. Skyvector

Fuente: Autores

Waypoint	Route	wDir	wSpd	TAS	Track WCA	TH Var	MH	GS	Dist	ETE ETO	ATE ATO	Fuel EFR	Fuel AFR
SKBO	-D+	111°	1	359	65°	66°	73°	358	11.7	2.0	0.0	0.0	
BO756	-D+	82°	2	359	356°	356°	4°	359	14.1	2.0	0.0	0.0	
ZIP 114.7	-D+	82°	2	359	+0°	+7°			4.3	2.4	0.0	0.0	
BO822	-D+	73°	4	359	27°	28°	35°	356	26.8	4.5	0.0	0.0	
YACAR	-D+	140°	3	359	+0°	+7°			8.8	11	0.0	0.0	
A301	-D+	140°	3	359	6°	7°	14°	361	63.9	19	0.0	0.0	
LOURA	A301	187°	1	359	+0°	+8°			2.2	2.2	0.0	0.0	
EJA 115.9	A301	14°	2	359	345°	345°	353°	360	13.0	3.5	0.0	0.0	
W12	W12	177°	2	359	-0°	+8°			25	25	0.0	0.0	
NEDOR	W12	162°	3	359	355°	356°	4°	362	21.4	3.6	0.0	0.0	
LOKOV	W12	146°	3	359	+0°	+8°	3°	362	39.5	29	0.0	0.0	
DEXOX	W12	144°	3	359	355°	356°	3°	362	29.5	6.6	0.0	0.0	
ELB 114.3	W12	144°	3	359	+0°	+7°			40	4.9	0.0	0.0	
EDVAR	W12	110°	10	359	356°	357°	4°	363	30.3	5.0	0.0	0.0	
STA 116.6	W9	105°	15	359	+1°	+7°			45	45	0.0	0.0	
UTGON	W9	105°	15	359	357°	0°	6°	363	62.9	10	0.0	0.0	
SKSM	W9	92°	11	359	+2°	+6°			56	8.9	0.0	0.0	
STA1D	STA1D	289°	3	359	345°	347°	355°	362	53.4	1h04	0.0	0.0	
UTGON	STA1D	14°	2	359	+2°	+8°			0.9	1h05	0.0	0.0	
SKSM	STA1D	285°	3	359	298°	298°	304°	357	5.4	1.5	0.0	0.0	
	8000	14°	2	359	-0°	+6°			0.9	1h05	0.0	0.0	
	8000	15°	3	359	38°	38°	46°	360	8.7	1.5	0.0	0.0	
	8000	15°	3	359	-0°	+8°			1h07	1h07	0.0	0.0	

Tabla 3. Waypoints ruta IR. Skyvector

Fuente: Autores.

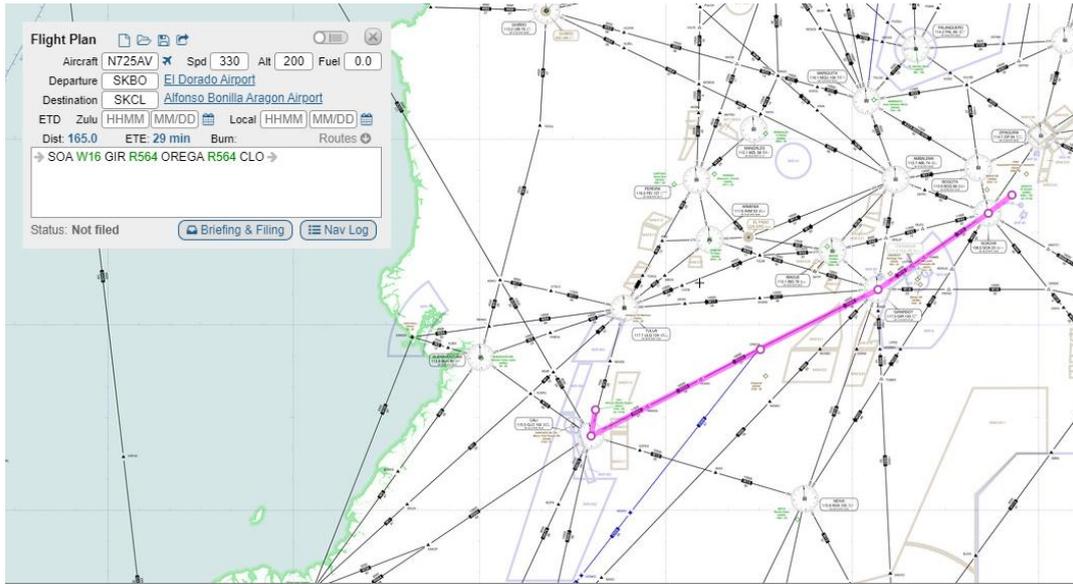


Figura 2. Plan de vuelo teórico ruta 2R. Skyvector

Fuente: Autores.

Waypoint	Route	Altitude	wDir	wSpd	TAS	Track WCA	TH Var	MH	GS	Dist	ETE ETO	ATE ATO	Fuel EFR	Fuel AFR
SKBO	•		116°	2	247	232°	232°	239°	248	9.6	2.2		0.0	
SOA 108.6	↘	11°C (+12°)	90°	7	267	235°	234°	242°	273	17.4	3.6		0.0	
TOC	↘	4°C (+15°)	71°	8	330	235°	235°	242°	337	7.6	1.4		0.0	
KAMIS	↘	-8°C (+16°)	71°	7	330	235°	235°	240°	337	5.0	0.9		0.0	
LOTOA	↘	-8°C (+16°)	72°	7	330	235°	235°	242°	336	9.0	1.6		0.0	
TOD	↘	-8°C (+16°)	75°	7	406	235°	235°	242°	413	4.2	0.6		0.0	
GIR 117.3	↘	-8°C (+16°)	75°	7	400	243°	243°	248°	408	42.6	6.5		0.0	
OREGA	↘	-8°C (+16°)	76°	8	370	242°	242°	246°	377	21.2	3.5		0.0	
DODGI	↘	-7°C (+16°)	95°	8	354	243°	242°	249°	357	19.3	20		0.0	
MANGA	↘	2°C (+15°)	120°	5	340	243°	243°	247°	343	20.6	3.7		0.0	
CLO 115.5	↘	7°C (+14°)	78°	2	326	10°	9°	15°	325	8.5	27		0.0	
SKCL	•	12°C (+14°)				-0°	+6°				29		0.0	

Tabla 4. Waypoints ruta 2R. Skyvector

Fuente: Autores.

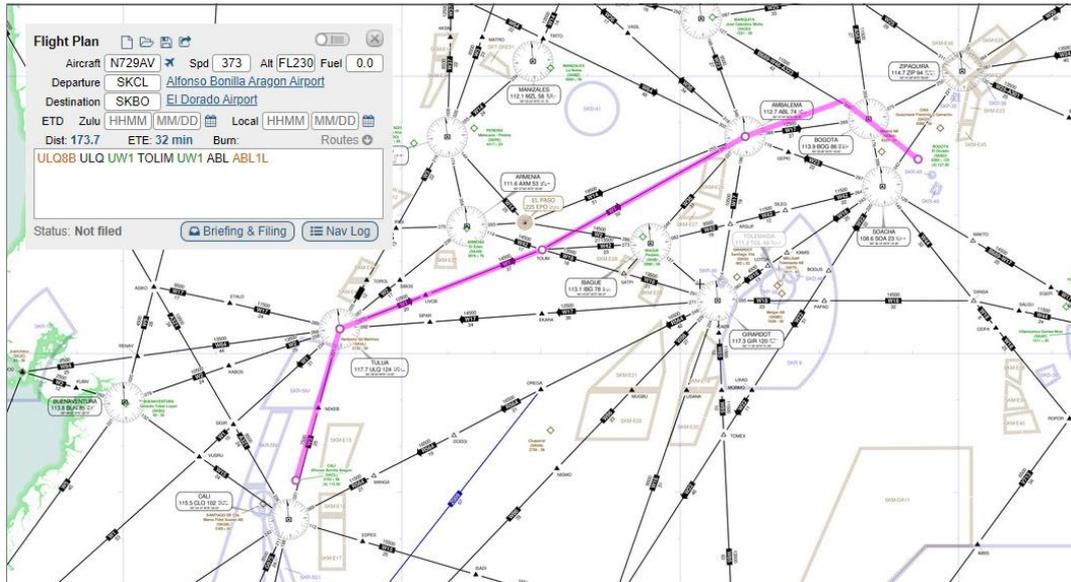


Figura 3. Plan de vuelo teórico ruta 3R. Skyvector

Fuente: Autores.

Waypoint	Route	wDir	wSpd	TAS	Track	TH	MH	GS	Dist	ETE	ATE	Fuel	Fuel
										ETO	ATO	EFR	AFR
SKCL N 03°32.59' W 076°22.90'	ULQ8B	81°	2	251	10°	10°	16°	250	3.1	0.7		0.0	
PL 274 N 03°35.08' W 076°22.38'	ULQ8B	80°	1	257	17°	17°	21°	257	30.9	6.5		0.0	
ULQ 117.7 N 04°05.40' W 076°13.42'	UW1	51°	10	323	69°	68°	74°	314	8.8	1.7		0.0	
TOC N 04°08.63' W 076°05.19'	UW1	79°	9	373	69°	69°	75°	364	11.2	1.8		0.0	
LIVOB N 04°12.72' W 075°54.80'	UW1	76°	8	373	69°	69°	74°	365	26.8	4.4		0.0	
TOD N 04°22.55' W 075°29.80'	UW1	76°	7	388	69°	69°	74°	381	0.0	15		0.0	
TOLIM N 04°22.55' W 075°29.80'	UW1	76°	7	385	61°	61°	67°	378	50.0	0.0		0.0	
ABL 112.7 N 04°47.03' W 074°46.05'	ABL1L	70°	7	346	70°	70°	76°	336	22.4	23		0.0	
AMVES N 04°54.77' W 074°24.94'	ABL1L	84°	11	329	128°	128°	135°	317	20.4	4.1		0.0	
SKBO N 04°42.10' W 074°08.82'		0°			-0°	+7°				3.9		0.0	
										32		0.0	

Tabla 5. Waypoints ruta 3R. Skyvector

Fuente: Autores.

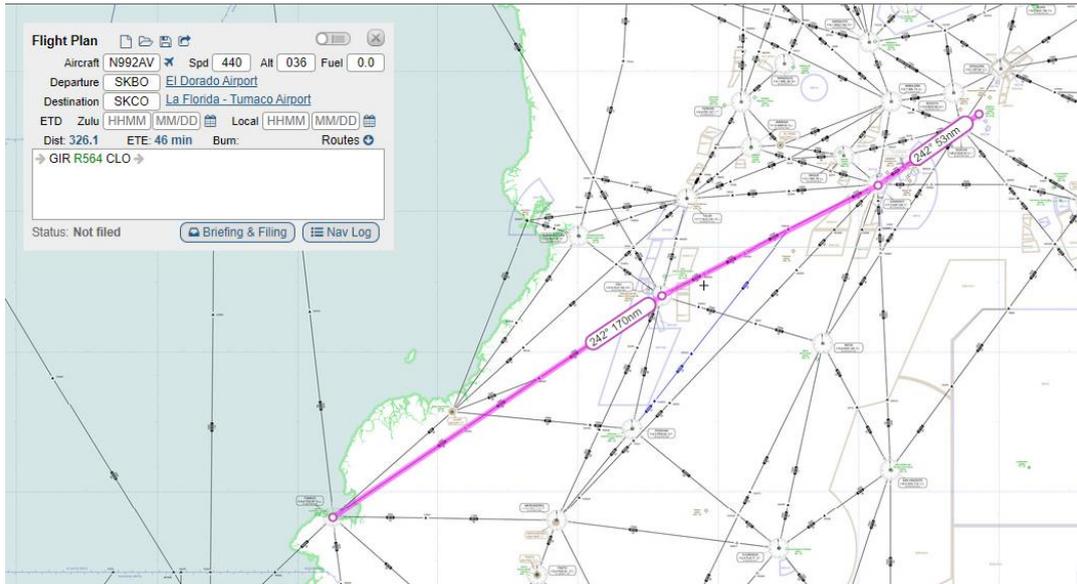


Figura 4. Plan de vuelo teórico ruta 4R. Skyvector

Fuente: Autores.

Waypoint	Route	wDir	wSpd	TAS	Track		MH	GS	Dist	ETE		Fuel	
					WCA	Var				ETO	ATO	EFR	AFR
SKBO N 04°42.10' W 074°08.82'	Altitude	145°	5	371	235°	234°	241°	371	35.4	6.0		0.0	
TOC N 04°21.56' W 074°37.79'	Altitude	15°C (+17°)	4	440	-1°	+8°	242°	436	17.3	6.0		0.0	
GIR 117.3 N 04°11.50' W 074°51.95'	R564	227°	4	440	235°	235°	242°	436	17.3	2.4		0.0	
OREGA N 03°52.30' W 075°30.00'	R564	23°C (+15°)	6	440	-0°	+8°	242°	435	42.6	8.3		0.0	
DODGI N 03°42.38' W 075°48.75'	R564	22°C (+14°)	4	440	243°	243°	248°	435	42.6	5.9		0.0	
MANGA N 03°33.58' W 076°06.00'	R564	146°	4	440	-0°	+5°	248°	435	42.6	14		0.0	
CLO 115.5 N 03°24.12' W 076°24.33'	R564	25°C (+17°)	2	440	242°	242°	246°	440	21.2	2.9		0.0	
TOD N 01°56.81' W 078°33.23'	R564	110°	2	440	-0°	+4°	246°	440	21.2	17		0.0	
SKCO N 01°48.86' W 078°44.94'	R564	25°C (+18°)	3	440	243°	243°	249°	442	19.3	2.6		0.0	
	R564	100°	3	440	-0°	+6°	249°	442	19.3	20		0.0	
	R564	26°C (+18°)	2	440	243°	243°	247°	443	20.6	2.8		0.0	
	R564	63°	2	440	-0°	+4°	247°	443	20.6	23		0.0	
	R564	24°C (+16°)	2	440	236°	236°	242°	442	155.5	21		0.0	
	R564	18°	6	345	-0°	+6°	242°	442	155.5	44		0.0	
	R564	20°C (+12°)	6	345	236°	237°	242°	349	14.1	2.5		0.0	
	R564	18°	6	345	+1°	+6°	242°	349	14.1	46		0.0	

Tabla 6. Waypoints ruta 4R. Skyvector

Fuente: Autores.

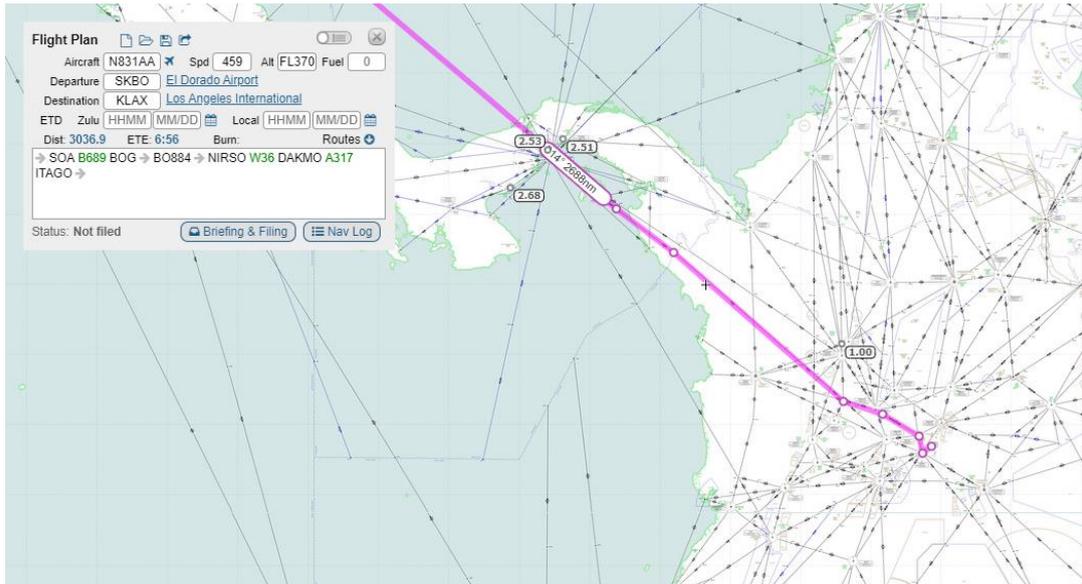


Figura 5. Plan de vuelo teórico ruta II. Skyvector

Fuente: Autores.

Waypoint	Route	wDir	wSpd	TAS	Track		MH	GS	Dist	ETE		Fuel	
					WCA	Var				ETO	ATO	EFR	AFR
SKBO N 04°42.10' W 074°58.82'	✈	145°	5	346	232°	231°	239°	345	9.6	1.6		0.0	
SOA 108.6 N 04°38.18' W 074°18.38'	↘	15°C (+17°)			-1°	+8°				1.6		0.0	
BOG 113.9 N 04°50.80' W 074°19.40'	↘	115°	12	369	348°	350°	357°	376	14.9	2.3		0.0	
BO884 N 04°50.80' W 074°19.40'	↘	5°C (+15°)			+1°	+7°				3.9		0.0	
NIRSO N 05°09.58' W 074°50.48'	✈	47°	9	405	301°	302°	310°	407	36.2	4.9		0.0	
BO884 N 05°09.58' W 074°50.48'	↘	-5°C (+17°)			+1°	+7°				8.8		0.0	
NIRSO N 05°20.50' W 075°23.88'	↘	152°	11	474	288°	287°	294°	482	35.1	4.3		0.0	
TOC N 05°21.35' W 075°24.84'	↘	-28°C (+15°)			-1°	+7°				13		0.0	
W36 N 05°20.50' W 075°23.88'	↘	171°	24	468	311°	310°	315°	486	1.3	0.2		0.0	
PULOX N 05°41.08' W 075°49.00'	↘	-48°C (+8°)			-2°	+5°				13		0.0	
W36 N 05°41.08' W 075°49.00'	↘	171°	24	459	311°	309°	314°	477	32.1	4.0		0.0	
EVSOS N 05°04.28' W 076°13.52'	↘	-49°C (+8°)			-2°	+5°				17		0.0	
W36 N 05°04.28' W 076°13.52'	↘	171°	23	459	311°	310°	315°	476	32.5	4.1		0.0	
W36 N 05°04.28' W 076°13.52'	↘	-49°C (+8°)			-2°	+6°				21		0.0	
DAKMO N 07°27.05' W 077°48.58'	↘	171°	21	459	311°	310°	315°	475	125.8	16		0.0	
W36 N 07°27.05' W 077°48.58'	↘	-49°C (+8°)			-2°	+6°				37		0.0	
A317 N 08°54.77' W 078°37.44'	↘	171°	11	459	307°	306°	310°	467	60.9	7.8		0.0	
ITAGO N 08°54.77' W 078°37.44'	↘	-48°C (+8°)			-1°	+4°				45		0.0	
W36 N 08°54.77' W 078°37.44'	↘	164°	8	459	311°	310°	313°	466	2402.8	5h26		0.0	
TOD N 31°45.82' W 118°23.72'	✈	-49°C (+8°)			-1°	+3°				6h11		0.0	
W36 N 31°45.82' W 118°23.72'	↘	227°	89	463	299°	288°	291°	427	285.7	44		0.0	
W36 N 31°45.82' W 118°23.72'	↘	-52°C (+4°)			-11°	+3°				6h56		0.0	

Tabla 7. Waypoints ruta II. Skyvector

Fuente: Autores.

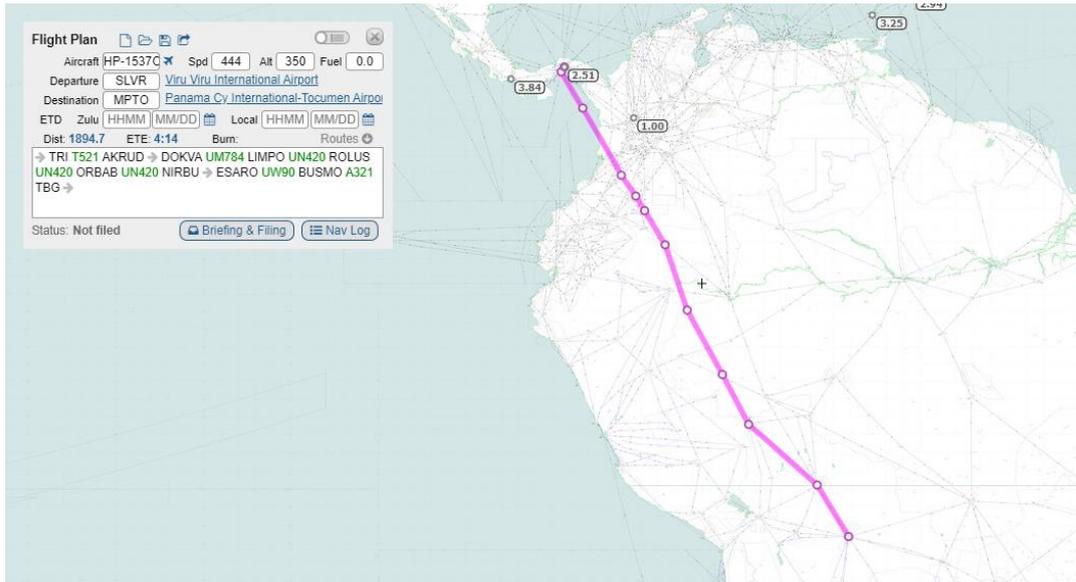


Figura 7. Plan de vuelo teórico ruta 4I. Skyvector

Fuente: Autores.

Waypoint	Route	Altitude	wDir	wSpd	TAS	Track	TH	MH	GS	Dist	ETE	ATE	Fuel	Fuel
											ETO	ATO	EFR	AFR
SLVR	-D-	314°	5	270	328°	328°	340°	265	84.5	15	15	0.0		
TOC	-D-	312°	15	444	329°	328°	340°	429	114.8	16	31	0.0		
TRI	T521	313°	12	444	312°	312°	322°	432	50.0	6.9	38	0.0		
AKRIM	T521	309°	11	444	312°	312°	322°	433	16.2	2.2		0.0		
RIXUM	T521	304°	10	444	311°	311°	321°	434	174.0	40		0.0		
ROBOK	T521	269°	13	444	311°	310°	318°	435	27.6	3.8		0.0		
BITAG	T521	261°	15	444	311°	310°	318°	435	14.5	1h08		0.0		
TINPO	T521	256°	16	444	311°	310°	317°	435	23.9	2.0		0.0		
AKRUD	-D-	250°	18	444	332°	330°	337°	441	190.8	1h10		0.0		
DOKVA	UM784	223°	26	444	331°	328°	335°	452	34.2	3.3		0.0		
IVSUP	UM784	218°	22	444	331°	329°	336°	452	98.1	1h13		0.0		
IPON	UM784	212°	20	444	331°	329°	336°	453	118.3	13		0.0		
LIMPO	UN420	199°	23	444	341°	339°	344°	462	236.5	16		0.0		
ROLUS	UN420	156°	25	444	329°	329°	335°	469	136.5	2h12		0.0		
ORBAB	UN420	167°	29	444	329°	328°	334°	472	59.0	17		0.0		
NIRBU	-D-	169°	27	444	325°	324°	330°	469	86.6	3h00		0.0		
ESARO	UW90	161°	24	444	333°	332°	336°	468	36.1	11		0.0		
CLO	UW90	158°	23	444	330°	330°	335°	467	57.9	3h18		0.0		
ASIKO	UW90	161°	22	444	330°	329°	333°	466	18.1	4.6		0.0		
TOD	-D-	90°	8	381	32°	32°	36°	371	20.0	7.4		0.0		

Waypoint	Route	Altitude	wDir	wSpd	TAS	Track	TH	MH	GS	Dist	ETE	ATE	Fuel	Fuel
											ETO	ATO	EFR	AFR
TOD	UW90	163°	22	472	330°	329°	333°	493	153.1	18		0.0		
BUSMO	A321	163°	21	483	329°	329°	332°	483	54.0	3h51		0.0		
IRATA	A321	249°	1	445	330°	331°	334°	449	89.7	6.9		0.0		
TBG	-D-	90°	8	381	32°	32°	36°	371	20.0	13		0.0		
MPTO	-D-	90°	8	381	32°	32°	36°	371	20.0	4h11		0.0		

Tabla 9. Waypoints ruta 4I. Skyvector

Fuente: Autores.

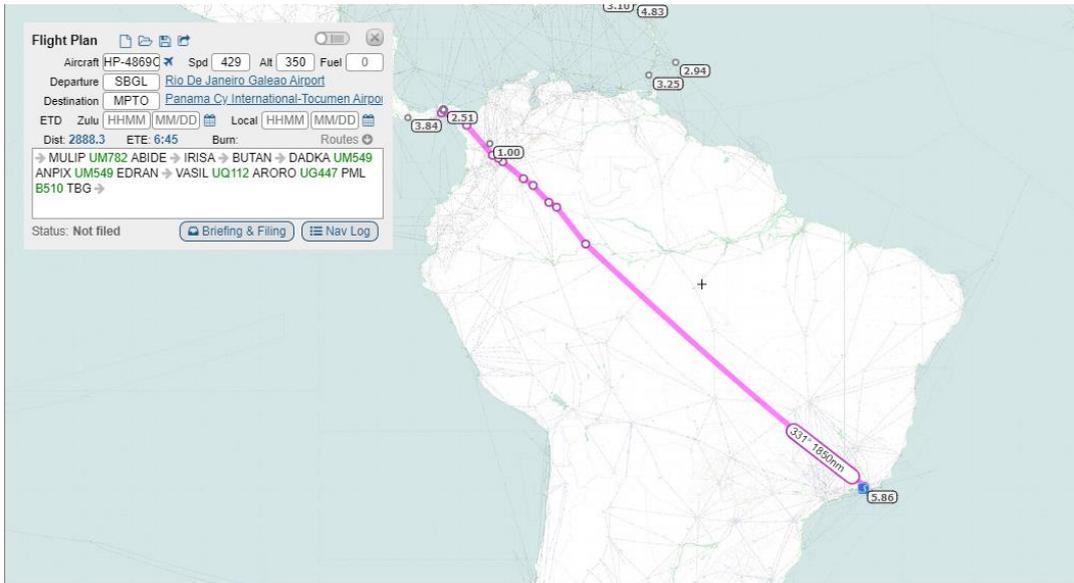


Figura 8. Plan de vuelo teórico ruta 5I. Skyvector

Fuente: Autores.

Waypoint	Route	Altitude	wDir	wSpd	TAS	Track WCA	TH Var	MI I	GS	Dist	ETE ETO	ATE ATO	Fuel EFR	Fuel AFR
SBGL	-D-		107°	7	283	308°	308°	331°	290	100.2	16		0.0	
TOC	-D-	35000	24°C (+9°)			+1°	+23°				16		0.0	
MULIP	-D-	285°	21	429	308°	307°	330°	410	1749.4	4h03		0.0		
ABIDE	UM782	35000	-44°C (+10°)		429	-1°	+23°				4h19		0.0	
IRISA	UM782	214°	12	429	322°	320°	330°	433	241.4	33		0.0		
BUTAN	ABIDE	35000	-43°C (+11°)		429	-2°	+10°				4h52		0.0	
DADKA	-D-	188°	21	429	302°	300°	308°	437	47.0	6.4		0.0		
ANPIX	IRISA	35000	-43°C (+12°)		429	-3°	+8°				4h58		0.0	
EDSPAN	BUTAN	35000	-42°C (+12°)		429	-2°	+9°				5h15		0.0	
VASIL	DADKA	35000	-43°C (+12°)		429	-2°	+7°				5h23		0.0	
TOD	UM549	166°	22	429	309°	308°	315°	442	119.2	8.2		0.0		
ARORO	ANPIX	35000	-43°C (+12°)		429	-2°	+8°				5h41		0.0	
PML	UM549	172°	22	429	309°	307°	312°	445	137.5	3.9		0.0		
DIEGO	EDSPAN	35000	-43°C (+11°)		429	-2°	+5°				5h45		0.0	
TBG	VASIL	168°	21	429	296°	294°	299°	441	29.0	4.6		0.0		
MPTO	TOC	35000	-43°C (+11°)		429	-2°	+5°				5h50		0.0	
	ARORO	166°	21	429	320°	318°	324°	447	102.2	14		0.0		
	PML	35000	-43°C (+11°)		429	-1°	+5°				6h04		0.0	
	DIEGO	172°	16	473	319°	318°	324°	486	100.4	13		0.0		
	TBG	UG447	-43°C (+11°)		415	-1°	+5°				6h17		0.0	
	MPTO	172°	16	415	312°	312°	317°	415	59.9	9.2		0.0		
		B510	-43°C (+11°)		371	-0°	+5°				6h26		0.0	
		228°	3	371	285°	285°	288°	372	70.6	12		0.0		
		-16°C (+17°)			320	+0°	+3°				6h38		0.0	
		69°	1	320	285°	287°	291°	326	17.0	3.2		0.0		
		-0°C (+18°)			307	+2°	+4°				6h41		0.0	
		43°	14	307	32°	31°	35°	295	20.0	4.1		0.0		
		16°C (+15°)				-1°	+4°				6h45		0.0	

Tabla 10. Waypoints ruta 5I. Skyvector

Fuente: Autores.

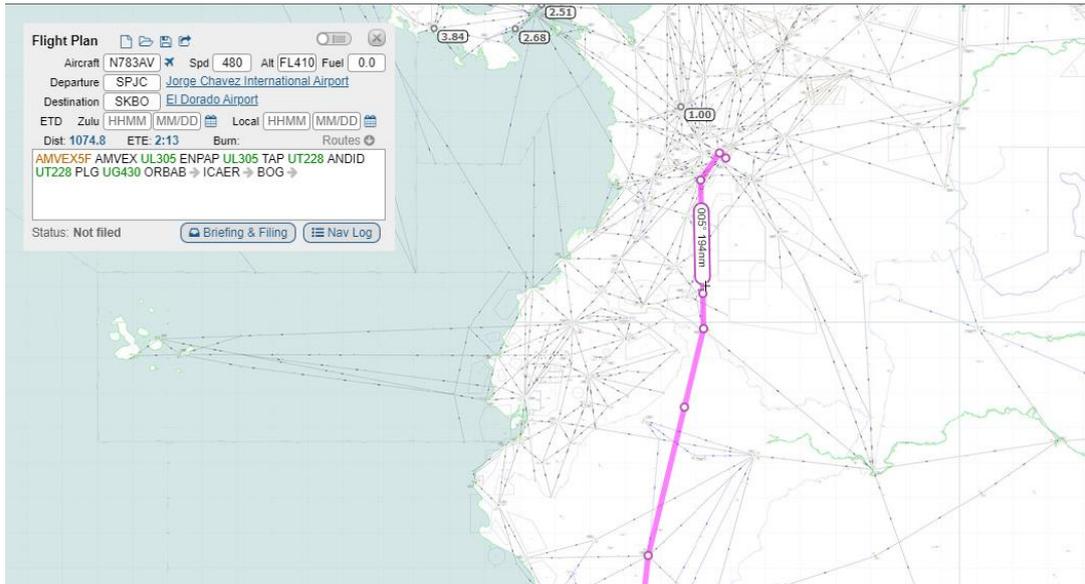


Figura 9. Plan de vuelo teórico ruta 6I. Skyvector

Fuente: Autores.

Waypoint	Route	wDir	wSpd	TAS	Track	TH	MH	GS	Dist	ETE	ATE	Fuel	Fuel
	Altitude	Temp (dev)			WCA	Var				ETO	ATO	EFR	AFR
SPJC	AMVEX5F	191°	8	305	154°	155°	156°	299	9.1	1.8		0.0	
SISEN	AMVEX5F	220°	1	331	62°	62°	63°	332	13.2	1.8		0.0	
JC811	AMVEX5F	168°	2	362	332°	332°	334°	363	13.6	2.3		0.0	
JC815	AMVEX5F	41°	11	391	346°	347°	349°	384	21.9	4.1		0.0	
JC401	AMVEX5F	21°	8	434	346°	346°	349°	427	10.0	2.2		0.0	
JC405	AMVEX5F	325°	7	453	28°	27°	29°	450	35.9	6.3		0.0	
AMVEX	UL305	255°	37	487	6°	2°	2°	500	36.7	10		0.0	
TOC	UL305	270°	33	480	6°	2°	3°	483	51.2	1.4		0.0	
TOKAN	UL305	264°	33	480	6°	2°	5°	486	51.0	11		0.0	
ENPAP	UL305	260°	33	480	6°	2°	4°	488	110.0	4.4		0.0	
TAP 115.5	UT228	250°	33	480	14°	11°	15°	498	197.2	15		0.0	
UMSOK	UT228	220°	38	480	14°	12°	17°	514	63.2	4.5		0.0	
ANDID	UT228	218°	38	480	14°	12°	17°	514	137.9	20		0.0	
PLG 112.8	UG430	208°	35	480	359°	357°	0°	510	60.1	20		0.0	
ORBAB	UG430	201°	31	480	359°	357°	4°	509	162.5	4.4		0.0	
TOD	ICAE	194°	23	491	359°	358°	5°	513	31.3	4.4		0.0	
ICAER	ICAE	191°	23	496	35°	37°	43°	502	56.2	15		0.0	
BOG 113.9	ICAE	149°	16	379	129°	129°	136°	369	13.7	16		0.0	
SKBO	ICAE	-35°C (+13°)			-1°	+7°				2.3		0.0	

Tabla 11. Waypoints ruta 6I. Skyvector

Fuente: Autores.

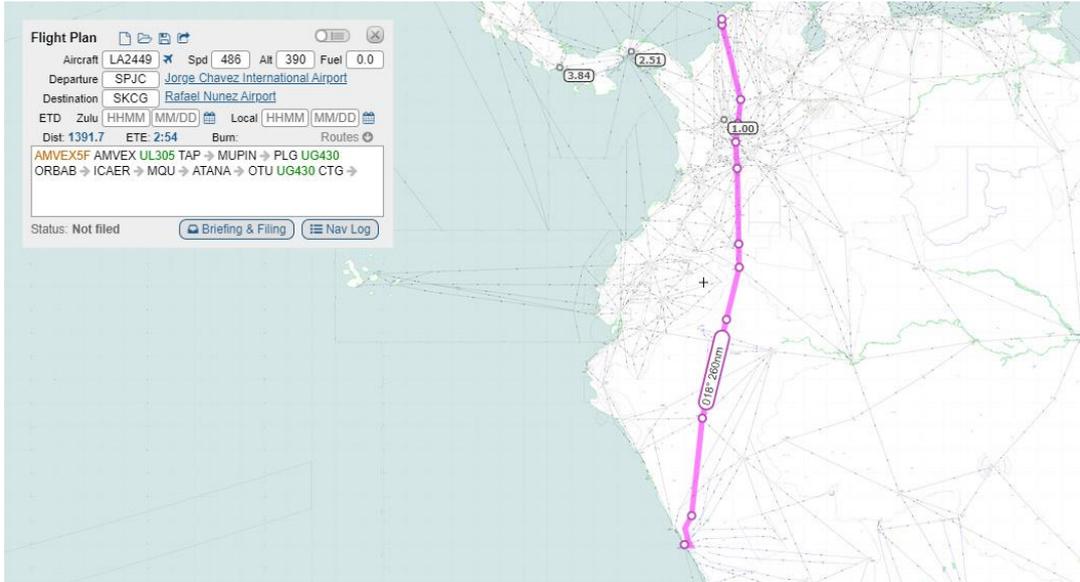


Figura 10. Plan de vuelo teórico ruta 7I. Skyvector

Fuente: Autores.

Waypoint	Route	wDir	wSpd	TAS	Track	TH	MH	GS	Dist	ETE	ATE	Fuel	Fuel
	Altitude	Temp (dev)			WCA	Var				ETO	ATO	EFR	AFR
SPJC	AMVEXSF	191°	8		154°	155°	156°	248	9.1	2.1		0.0	
SISEN	AMVEXSF	193° (+5°)		254	+1°	+1°				2.1		0.0	
JC811	AMVEXSF	153°	4	281	62°	62°	64°	281	13.2	2.7		0.0	
JC815	AMVEXSF	18°C (+15°)		313	+1°	+2°				4.8		0.0	
JC401	AMVEXSF	22°	4	313	332°	333°	335°	310	13.6	2.5		0.0	
JC405	AMVEXSF	7°C (+17°)		343	+1°	+2°				7.3		0.0	
AMVEX	AMVEXSF	39°	10	343	346°	347°	349°	337	21.9	3.7		0.0	
UL305	AMVEXSF	-5°C (+17°)		389	+1°	+2°				11		0.0	
UL305	AMVEXSF	304°	8	389	346°	345°	347°	382	10.0	1.5		0.0	
UL305	AMVEXSF	-22°C (+16°)		406	-1°	+2°				13		0.0	
UL305	AMVEXSF	251°	24	406	28°	26°	28°	424	35.9	4.7		0.0	
UL305	AMVEXSF	-30°C (+14°)		463	-2°	+2°				17		0.0	
UL305	UL305	264°	43	463	6°	1°	1°	470	3.3	0.4		0.0	
UL305	UL305	-52°C (+5°)		486	-5°	+0°	2°	492	84.5	18		0.0	
UL305	UL305	266°	42	486	6°	1°				10		0.0	
UL305	UL305	-54°C (+3°)		486	-5°	+0°	5°	496	51.0	28		0.0	
UL305	UL305	259°	39	486	6°	2°				6.2		0.0	
UL305	UL305	-53°C (+3°)		486	-4°	+3°	4°	497	110.0	34		0.0	
UL305	UL305	257°	36	486	6°	2°				13		0.0	
UL305	UL305	-53°C (+3°)		486	-4°	+2°				47		0.0	
UL305	UL305	244°	29	486	14°	11°	15°	504	260.4	31		0.0	
UL305	UL305	-53°C (+3°)		486	-3°	+4°				1h18		0.0	
UL305	UL305	201°	34	486	14°	13°	17°	520	137.9	16		0.0	
UL305	UL305	-54°C (+3°)		486	-0°	+3°				1h34		0.0	
UL305	UL305	195°	36	486	359°	358°	1°	520	60.1	6.9		0.0	
UL305	UL305	-54°C (+3°)		486	-1°	+4°				1h41		0.0	
UL305	UL305	190°	33	486	359°	358°	5°	519	193.9	23		0.0	
UL305	UL305	-54°C (+3°)		486	-1°	+6°				2h03		0.0	
UL305	UL305	189°	24	486	357°	356°	3°	510	31.8	3.7		0.0	
UL305	UL305	-54°C (+3°)		462	-1°	+7°				2h07		0.0	
UL305	UL305	190°	24	462	357°	356°	3°	485	36.0	4.4		0.0	
UL305	UL305	-54°C (+3°)		472	-1°	+7°				2h12		0.0	
UL305	UL305	190°	24	472	7°	7°	13°	492	48.0	5.8		0.0	
UL305	UL305	-54°C (+3°)		485	+1°	+6°				2h17		0.0	
UL305	UL305	172°	20	485	7°	7°	14°	496	61.3	7.4		0.0	
UL305	UL305	-44°C (+11°)		499	+0°	+7°				2h25		0.0	
UL305	UL305	168°	12	499	346°	346°	351°	497	37.4	4.6		0.0	
UL305	UL305	-31°C (+14°)			+0°	+5°				2h29		0.0	
GERNA	UG430	23°	3	481	346°	347°	353°	477	104.8	14		0.0	
GERNA	UG430	-17°C (+17°)		407	+0°	+7°				2h43		0.0	
GERNA	UG430	26°	5	407	346°	348°	354°	413	53.8	8.2		0.0	
GERNA	UG430	-9°C (+18°)		369	+2°	+6°				2h52		0.0	
GERNA	UG430	102°	15	369	358°	359°	6°	369	14.0	2.3		0.0	
GERNA	UG430	12°C (+16°)			+1°	+7°				2h54		0.0	

Tabla 12. Waypoints ruta 7I. Skyvector

Fuente: Autores.

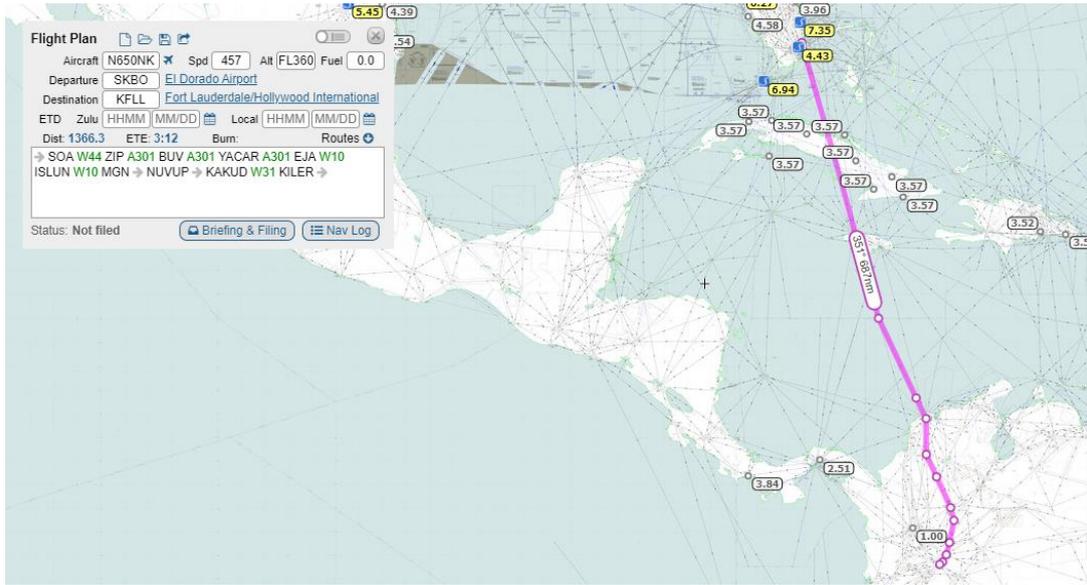


Figura 11. Plan de vuelo teórico ruta 8I. Skyvector

Fuente: Autores.

Waypoint	Route	wDir	wSpd	TAS	Track	TH	MH	GS	Dist	ETE	ATE	Fuel	Fuel
	Altitude	Temp (dev)			WCA	Var				ETO	ATO	EFR	AFR
SKBO	0	146° 5		294	232°	231°	239°	294	9.6	1.9		0.0	
SOA 108.6	W44	120° 10		311	35°	37°	44°	310	30.1	1.9		0.0	
ZIP 114.7	A301	6°C (+15°)			+2°	+7°				5.5		0.0	
BUV 116.2	A301	44° 7		364	14°	15°	21°	358	31.6	7.4		0.0	
	A301	-12°C (+17°)			+1°	+7°				5.0		0.0	
TOC	A301	128° 9		389	12°	13°	20°	393	29.3	12		0.0	
	A301	-30°C (+15°)			+1°	+7°				4.5		0.0	
GIKPU	36000	181° 18		457	12°	12°	19°	475	0.7	17		0.0	
	A301	-46°C (+10°)			+0°	+7°				0.1		0.0	
YACAR	36000	181° 18		457	12°	12°	20°	475	27.9	3.5		0.0	
	A301	-46°C (+10°)			+0°	+8°				20		0.0	
LOURA	36000	185° 18		457	345°	345°	352°	474	13.0	1.6		0.0	
	A301	-46°C (+10°)			-1°	+8°				2.6		0.0	
EJA 115.9	W10	186° 16		457	335°	334°	342°	471	20.4	25		0.0	
	36000	-46°C (+10°)			-1°	+8°				2.6		0.0	
ORELU	W10	189° 16		457	335°	334°	341°	471	36.7	27		0.0	
	36000	-46°C (+10°)			-1°	+7°				4.7		0.0	
TESIR	W10	190° 16		457	336°	335°	340°	470	28.8	32		0.0	
	36000	-46°C (+10°)			-1°	+5°				3.7		0.0	
ISLUN	W10	192° 16		457	335°	334°	341°	470	62.5	36		0.0	
	36000	-46°C (+10°)			-1°	+7°				8.0		0.0	
MGN 114.1	NUVUP	205° 17		457	0°	359°	4°	472	90.6	44		0.0	
	36000	-46°C (+10°)			-1°	+5°				12		0.0	
NUVUP	W31	251° 20		457	334°	332°	339°	458	57.5	55		0.0	
	36000	-46°C (+10°)			-3°	+7°				7.5		0.0	
KAKUD	W31	288° 21		457	335°	332°	340°	454	219.8	1h03		0.0	
	36000	-46°C (+10°)			-3°	+7°				29		0.0	
KILER	W31	288° 21		457	345°	343°	349°	446	591.2	1h32		0.0	
	36000	-46°C (+10°)			-2°	+6°				2h54		0.0	
TOD	W31	288° 21		457	345°	343°	349°	446	591.2	18		0.0	
	36000	-46°C (+10°)			-2°	+6°				3h12		0.0	
KFLLL	0	313° 44		391	344°	341°	347°	352	95.6			0.0	
	0	-49°C (+7°)			-3°	+6°						0.0	

Tabla 13. Waypoints ruta 8I. Skyvector

Fuente: Autores.

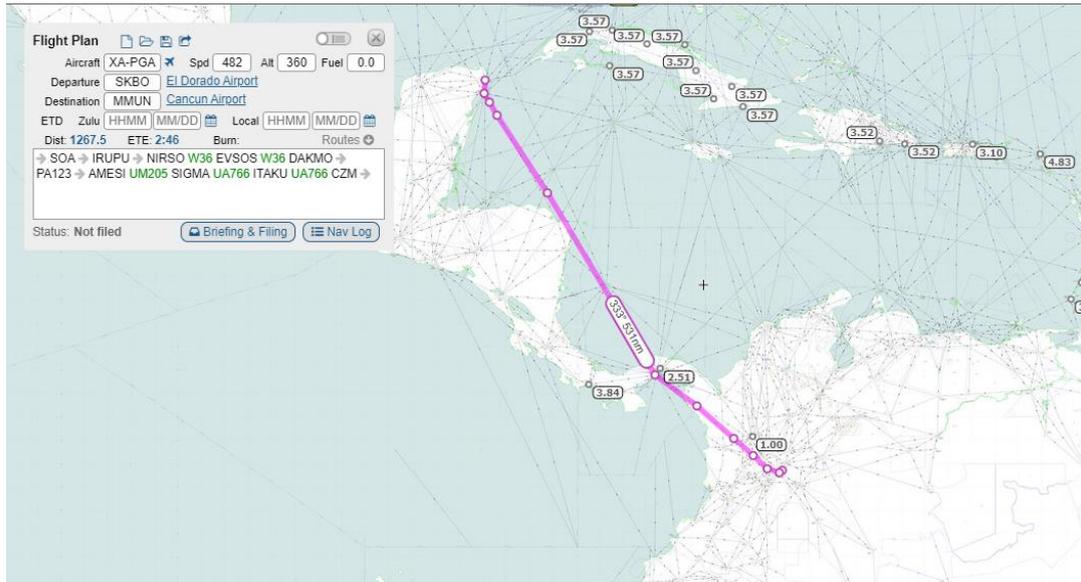


Figura 12. Plan de vuelo teórico ruta 9I. Skyvector

Fuente: Autores.

Waypoint	Route	wDir	wSpd	TAS	Track	TH	MH	GS	Dist	ETE	ATE	Fuel	Fuel
	Altitude	Temp (dev)			WCA	Var				ETO	ATO	EFR	AFR
SKBO N 04°42.10' W 074°08.82'	-D-	146°	5	269	232°	231°	238°	268	9.6	2.1		0.0	
SOA 108.6 N 04°36.18' W 074°16.35'	-D-	113°	12	288	288°	288°	295°	300	32.5	2.1		0.0	
IRUPU N 04°46.12' W 074°47.38'	-D-	4°C (+15°)	8	350	-0°	+7°	313°	314°	6.4	8.1		0.0	
TOC N 05°14.96' W 075°17.99'	-D-	93°	8	482	+1°	+7°	313°	311°	14	6.4		0.0	
NIRSO N 05°20.50' W 075°23.88'	-D-	172°	23	482	313°	311°	318°	500	8.1	1.0		0.0	
PULOX N 05°42.68' W 075°49.00'	W36	-46°C (+10°)	23	482	-2°	+7°	315°	499	33.4	15		0.0	
EVSOS N 05°04.28' W 076°13.52'	W36	171°	20	482	-2°	+5°	311°	310°	3.9	4.0		0.0	
DAKMO N 07°27.68' W 077°48.58'	W36	171°	22	482	-46°C (+10°)	23	311°	310°	23	19		0.0	
PA123 N 08°47.40' W 079°33.98'	W36	171°	20	482	-46°C (+10°)	23	311°	310°	15	15		0.0	
AMESI N 16°26.15' W 084°12.58'	-D-	168°	12	482	307°	306°	309°	491	132.8	16		0.0	
TOD N 16°40.24' W 084°21.96'	-D-	-46°C (+10°)	2	482	-1°	+4°	330°	330°	55	55		0.0	
SIGMA N 19°36.98' W 089°21.00'	UM205	138°	2	482	+0°	+4°	333°	484	530.7	1h06		0.0	
ITAKU N 20°08.77' W 090°41.13'	-D-	1°	10	482	327°	328°	330°	474	16.7	2h03		0.0	
CZM 112.5 N 20°30.45' W 090°54.12'	UA766	-47°C (+9°)	10	469	327°	328°	330°	460	209.9	28		0.0	
MMUN N 21°02.56' W 090°52.39'	UA766	1°	10	396	330°	332°	335°	399	36.5	2h31		0.0	
	UA766	-46°C (+9°)	16	369	330°	332°	333°	374	25.0	5.7		0.0	
	-D-	74°	13	351	4°	6°	8°	348	32.1	4.1		0.0	
	-D-	5°C (+17°)	13	351	+2°	+2°				5.7		0.0	
	-D-	12°C (+15°)			+2°	+2°				2h46		0.0	

Tabla 14. Waypoints ruta 9I. Skyvector

Fuente: Autores.

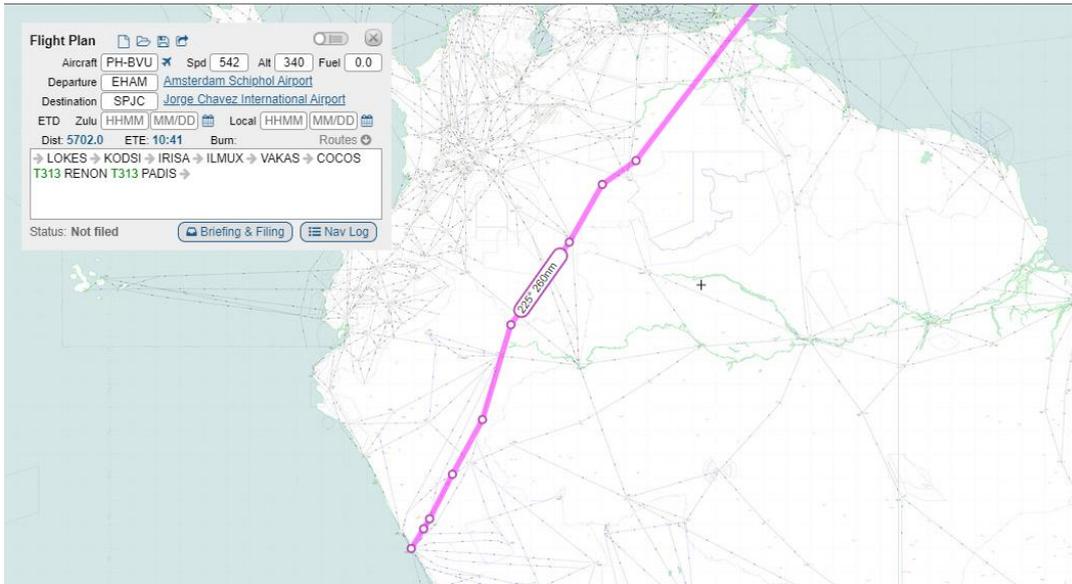


Figura 13. Plan de vuelo teórico ruta 10I. Skyvector

Fuente: Autores.

Waypoint	Route	wDir	wSpd	TAS	Track	TH	MH	GS	Dist	ETE	ATE	Fuel	Fuel
	Altitude	Temp (dev)			WCA	Var				ETO	ATO	EFR	AFR
EHAM N 52°18.08' E 004°45.85'	↘	206° 14 9°C (-5°)	300	259°	257°	-2°	+0°	257°	292	76.3	12	0.0	
TOC N 52°02.59' E 002°44.68'	↘	197° 18 -49°C (+4°)	542	257°	255°	-2°	+0°	255°	533	4460.8	8h13	0.0	
LOKES N 04°36.22' W 067°23.98'	↘	246° 12 -40°C (+12°)	542	235°	235°	+0°	+10°	245°	530	105.5	8h25	0.0	
KODSI N 03°34.93' W 068°56.13'	↘	231° 11 -40°C (+13°)	542	210°	210°	+0°	+11°	221°	532	170.9	8h37	0.0	
IRISA N 01°55.85' W 072°50.93'	↘	181° 21 -40°C (+13°)	542	215°	214°	-1°	+9°	223°	525	260.2	19	0.0	
ILMUX S 02°21.72' W 072°50.93'	↘	169° 25 -40°C (+13°)	542	197°	195°	-1°	+7°	202°	520	254.2	30	0.0	
VAKAS S 06°33.42' W 074°04.03'	↘	196° 15 -40°C (+12°)	542	209°	208°	-0°	+6°	214°	527	45.4	29	0.0	
TOD S 07°12.48' W 074°23.92'	↘	212° 14 -40°C (+12°)	476	209°	209°	+0°	+6°	214°	462	113.6	5.2	0.0	
COCOS S 08°52.58' W 075°20.95'	↘	211° 14 -40°C (+12°)	504	207°	207°	+0°	+2°	209°	505	41.6	10h01	0.0	
LUVSO S 09°29.82' W 075°40.09'	↘	326° 1 -12°C (+18°)	511	207°	207°	-0°	+3°	210°	514	85.1	14	0.0	
RENON S 10°45.87' W 076°13.43'	↘	43° 3 -4°C (+17°)	489	211°	211°	-0°	+3°	214°	493	29.5	10h15	0.0	
PADIS S 11°11.27' W 076°34.88'	↘	57° 4 11°C (+17°)	470	212°	212°	-0°	+2°	215°	473	58.9	10	0.0	
SPJC S 12°01.31' W 077°56.86'	↘										3.6	0.0	
											7.9	0.0	
											10h33	0.0	
											10h41	0.0	

Tabla 15. Waypoints ruta 10I. Skyvector

Fuente: Autores.

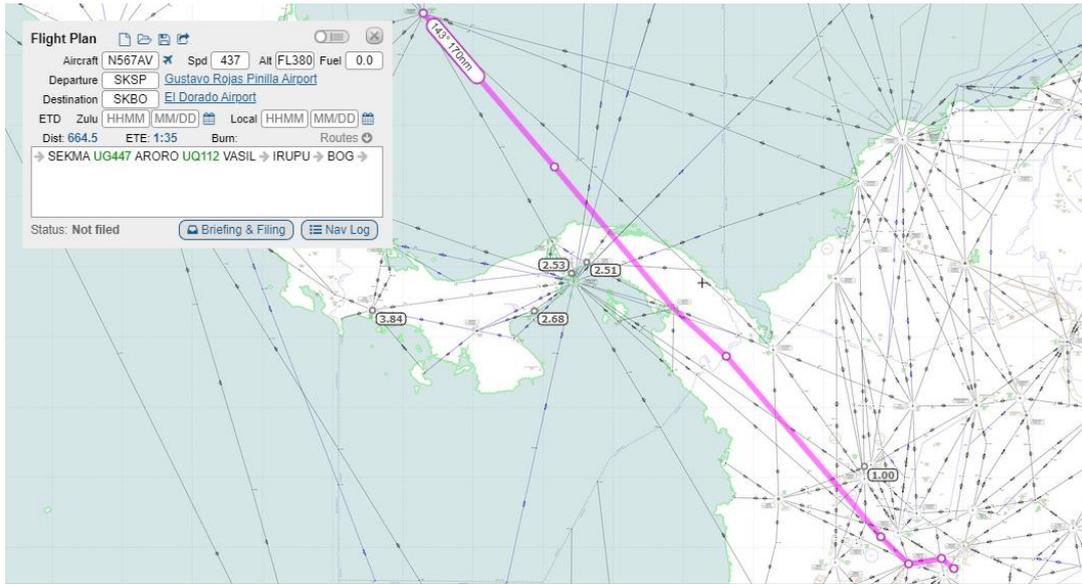


Figura 14. Plan de vuelo teórico ruta III. Skyvector

Fuente: Autores.

Waypoint	Route	wDir	wSpd	TAS	Track	TH	MH	GS	Dist	ETE	ATE	Fuel	Fuel
	Altitude	Temp (dev)			WCA	Var				ETO	ATO	EFR	AFR
SKSP N 12°35.02' W 081°42.68'	-D-	58° 19		303	139°	136°	140°	299	147.0	22		0.0	
TOC N 10°42.67' W 080°05.43'	-D-	214° 8		437	140°	141°	145°	435	22.8	22		0.0	
SEKMA N 10°25.17' W 079°50.44'	UG447	-51°C (+5°)	4	437	+1°	+4°	143°	436	157.0	3.2		0.0	
PML 113.1 N 07°58.31' W 078°08.31'	UG447	-51°C (+5°)	7	437	+1°	+3°	136°	432	59.9	25		0.0	
ARORO N 07°44.08' W 077°23.48'	UG447	-51°C (+6°)	12	437	+1°	+5°	146°	430	178.5	8.3		0.0	
TOD N 05°27.78' W 075°26.92'	UQ112	-51°C (+5°)	22	453	+2°	+5°	146°	435	24.1	55		0.0	
VASIL N 05°09.53' W 075°11.25'	-D-	173° 22		472	134°	135°	140°	458	33.2	1h21		0.0	
IRUPU N 04°46.12' W 074°47.38'	-D-	157° 15		421	81°	80°	87°	415	28.3	3.3		0.0	
BOG 113.9 N 04°50.80' W 074°19.40'	-D-	-32°C (+14°)		369	-0°	+7°	136°	358	13.7	4.5		0.0	
SKBO N 04°42.10' W 074°08.82'	-D-	58° 7			129°	129°				2.3		0.0	
		-11°C (+17°)			-1°	+7°				1h35		0.0	

Tabla 16. Waypoints ruta III. Skyvector

Fuente: Autores.

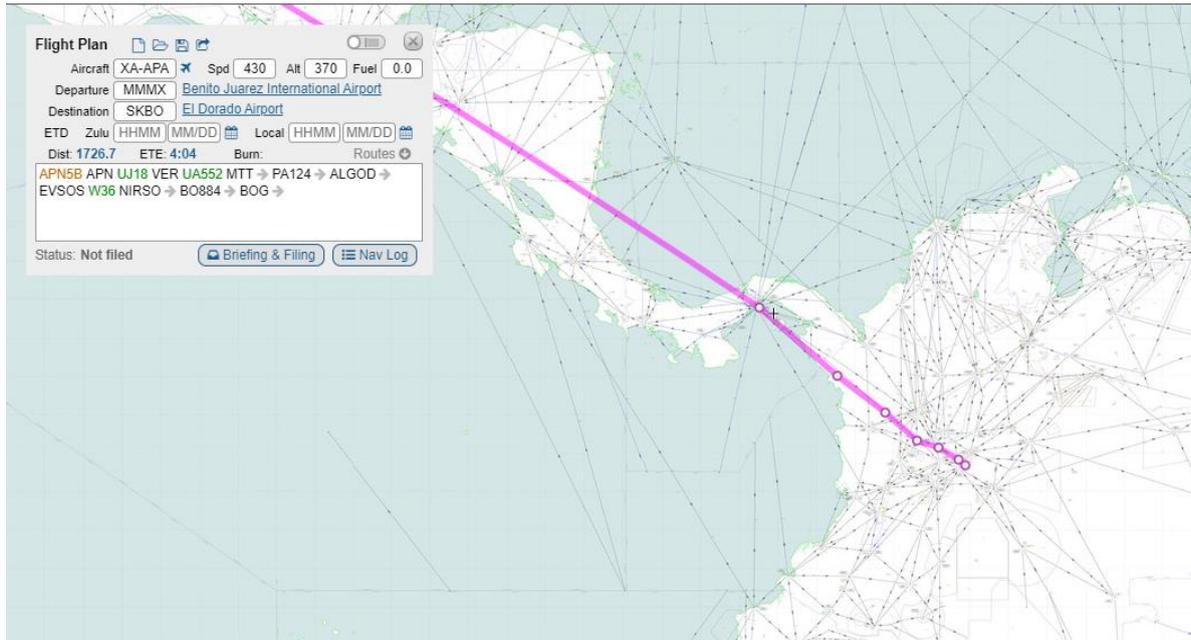


Figura 15. Plan de vuelo teórico ruta 12I. Skyvector

Fuente: Autores.

Waypoint	Route	wDir	wSpd	TAS	Track WCA	TH Var	MH	GS	Dist	ETE ETO	ATE ATO	Fuel EFR	Fuel AFR
MMM	APN5B	358°	4	273	88°	87°	80°	273	14.8	3.1		0.0	
D239Z	APN5B	111°	8	306	64°	65°	60°	301	9.0	1.8		0.0	
D239Q	APN5B	120°	15	326	64°	66°	61°	317	17.0	3.1		0.0	
APN 114.8	UJ18	126°	12	360	103°	104°	98°	349	33.5	5.3		0.0	
ALMET	UJ18	189°	7	416	103°	104°	100°	416	10.9	1.5		0.0	
TOC	UJ18	181°	7	430	103°	104°	100°	428	34.4	15		0.0	
TEVET	UJ18	180°	8	430	103°	104°	101°	428	50.0	7.0		0.0	
VER 114	UA552	200°	4	430	124°	124°	120°	429	25.0	3.5		0.0	
IPTAK	UA552	215°	2	430	124°	124°	120°	430	37.8	5.3		0.0	
DUPLO	UA552	163°	1	430	124°	124°	120°	430	47.9	35		0.0	
MTT 116.4	PA124	71°	2	430	120°	120°	116°	428	1042.3	2h27		0.0	
PA124	PA124	33°	2	430	131°	131°	134°	430	149.5	3h09		0.0	
TOD	PA124	33°	2	430	131°	131°	134°	430	149.5	21		0.0	
ALGOD	PA124	165°	14	467	131°	132°	136°	455	10.4	3h30		0.0	
ALGOD	PA124	165°	14	467	131°	132°	136°	455	10.4	1.4		0.0	
ALGOD	PA124	165°	14	467	131°	132°	136°	455	10.4	3h32		0.0	
EVSOS	W36	168°	15	495	131°	132°	137°	489	93.4	12		0.0	
EVSOS	W36	168°	15	495	131°	132°	137°	489	93.4	4.1		0.0	
PULOX	W36	152°	7	473	131°	131°	137°	469	33.4	3h48		0.0	
PULOX	W36	152°	7	473	131°	131°	137°	469	33.4	4.4		0.0	
NIRSO	W36	152°	7	473	131°	131°	137°	469	33.4	3h52		0.0	
NIRSO	W36	152°	7	473	131°	131°	137°	469	33.4	4.9		0.0	
BO884	W36	152°	7	473	131°	131°	137°	469	33.4	3h57		0.0	
BO884	W36	152°	7	473	131°	131°	137°	469	33.4	5.4		0.0	
BOG 113.9	W36	152°	7	473	131°	131°	137°	469	33.4	2.1		0.0	
BOG 113.9	W36	152°	7	473	131°	131°	137°	469	33.4	4h02		0.0	
SKBO	W36	152°	7	473	131°	131°	137°	469	33.4	2.1		0.0	
SKBO	W36	152°	7	473	131°	131°	137°	469	33.4	4h04		0.0	

Tabla 17. Waypoints ruta 12I. Skyvector

Fuente: Autores.

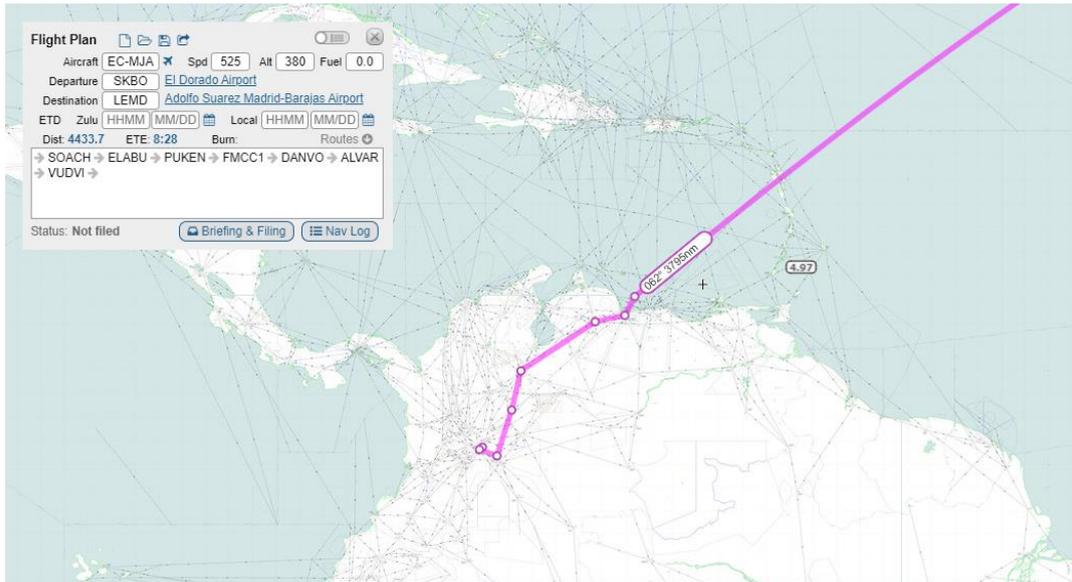


Figura 16. Plan de vuelo teórico ruta 131. Skyvector

Fuente: Autores.

Waypoint	Route	wDir	wSpd	TAS	Track	TH	MH	GS	Dist	ETE	ATE	Fuel	Fuel
	Altitude	Temp (dev)			WCA	Var				ETO	ATO	EFR	AFR
SKBO N 04°42.10' W 074°08.82'	-D-	146°	5	342	232°	231°	239°	342	9.6	1.6		0.0	
SOACH N 04°36.18' W 074°16.35'	-D-	15°C (+17°)			-1°	+8°				1.6		0.0	
ELABU N 04°19.90' W 073°31.43'	-D-	122°	9	359	110°	110°	117°	350	47.7	7.3		0.0	
TOC N 05°19.87' W 073°12.24'	-D-	6°C (+15°)			+0°	+7°				8.9		0.0	
PUKEN N 05°17.48' W 072°53.73'	-D-	88°	11	445	18°	19°	25°	441	62.7	8.1		0.0	
FMCC1 N 07°57.84' W 072°30.02'	-D-	-20°C (+16°)			+1°	+6°				17		0.0	
DANVO N 10°03.28' W 069°19.83'	-D-	185°	24	525	18°	18°	24°	548	60.2	6.6		0.0	
ALVAR N 11°07.13' W 065°38.50'	-D-	-51°C (+5°)			+1°	+6°				24		0.0	
VUDVI N 11°07.13' W 065°38.50'	-D-	192°	21	525	13°	13°	20°	546	102.6	11		0.0	
TOD N 40°08.91' W 005°10.21'	-D-	-51°C (+5°)			+0°	+7°				35		0.0	
LEMD N 40°28.33' W 003°33.65'	-D-	38000	-51°C (+5°)	525	56°	57°	66°	541	225.8	25		0.0	
	-D-	209°	18	525	+1°	+9°				1h00		0.0	
	-D-	252°	22	525	78°	78°	88°	546	76.6	8.4		0.0	
	-D-	-51°C (+5°)			+0°	+10°				1h08		0.0	
	-D-	259°	24	525	28°	26°	37°	540	53.7	6.0		0.0	
	-D-	-51°C (+5°)			-2°	+11°				1h14		0.0	
	-D-	264°	29	525	50°	48°	60°	549	3673.4	6h57		0.0	
	-D-	-51°C (+5°)			-2°	+12°				8h11		0.0	
	-D-	304°	69	464	80°	74°	86°	512	121.3	17		0.0	
	-D-	-51°C (+5°)			-6°	+12°				8h28		0.0	

Tabla 18. Waypoints ruta 131. Skyvector

Fuente: Autores.

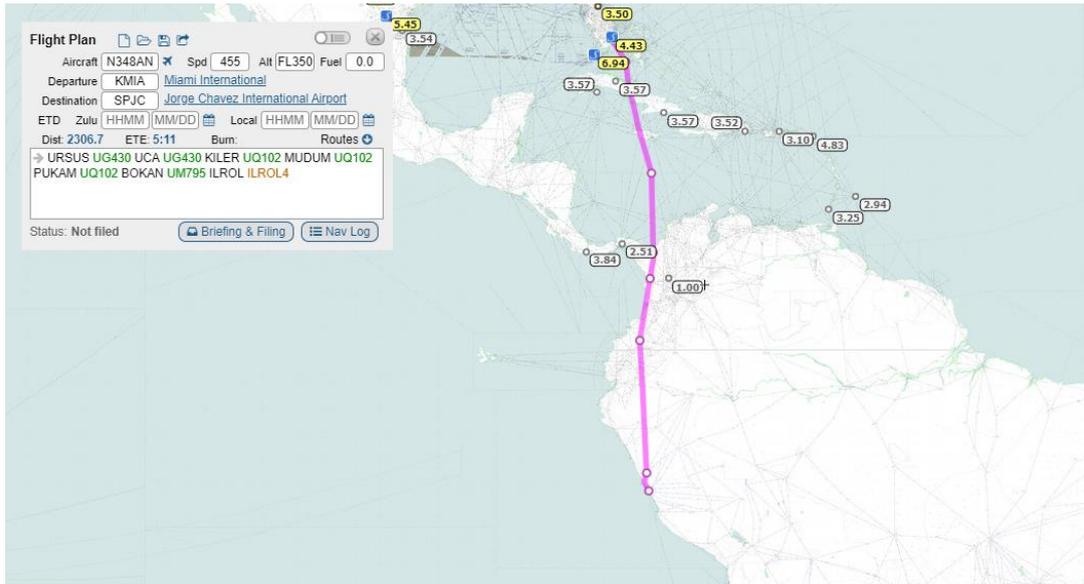


Figura 17. Plan de vuelo teórico ruta 14I. Skyvector

Fuente: Autores.

ESPACIO INTENCIONALMENTE DEJADO EN BLANCO

Waypoint	Route	Altitude	wDir	wSpd	TAS	Track	TH	MH	GS	Dist	ETE	ATE	Fuel	Fuel
			Temp (dev)	WCA		Var	ETO				ATO	EFR	AFR	
KMIA N 23°47.27' W 080°17.41'	↖		78°	16	254	148°	145°	150°	248	126.3	20		0.0	
URSUS N 24°00.00' W 079°04.19'	↘	35000	26°C (+11°)		417	-3°	+5°	183°	457	1.2	20		0.0	
TOC N 23°58.81' W 079°04.03'	↘	35000	-46°C (+8°)		455	+3°	+7°	183°	495	42.6	20		0.0	
BIBAT N 23°16.37' W 078°58.57'	↘	35000	-47°C (+7°)		455	+2°	+7°	182°	492	75.7	5.2		0.0	
UCA 117.4 N 22°00.90' W 078°48.95'	↘	35000	-47°C (+8°)		455	+2°	+7°	182°	492	75.7	25		0.0	
PUTUL N 19°58.57' W 078°11.60'	↘	35000	-46°C (+8°)		455	+0°	+6°	173°	490	125.4	15		0.0	
SIA 115.7 N 18°30.06' W 077°55.45'	↘	35000	-46°C (+8°)		455	167°	166°	172°	484	90.6	11		0.0	
BEREX N 16°20.82' W 077°16.63'	↘	35000	-46°C (+8°)		455	-0°	+6°	170°	477	134.0	1h01		0.0	
KILER N 15°00.00' W 076°52.82'	↘	35000	-44°C (+10°)		455	164°	163°	170°	477	134.0	17		0.0	
LODOR N 09°29.37' W 076°45.50'	↘	35000	-43°C (+11°)		455	-1°	+7°	171°	469	83.7	1h18		0.0	
MUDUM N 08°19.70' W 076°43.98'	↘	35000	-43°C (+11°)		455	164°	165°	171°	469	83.7	11		0.0	
LCE 112.6 N 07°49.08' W 076°43.32'	↘	35000	-43°C (+11°)		455	+1°	+6°	187°	461	328.6	1h29		0.0	
PUKAM N 05°07.37' W 077°00.25'	↘	35000	-43°C (+11°)		455	179°	179°	184°	441	70.0	43		0.0	
BOKAN N 02°48.52' W 077°52.83'	↘	35000	-43°C (+11°)		455	+2°	+6°	184°	441	70.0	10		0.0	
VANIK S 02°27.03' W 077°48.42'	↘	35000	-43°C (+11°)		455	179°	179°	184°	441	70.0	2h12		0.0	
LOBOT S 02°56.53' W 077°39.67'	↘	35000	-43°C (+11°)		455	+1°	+5°	184°	441	70.0	10		0.0	
AKVAK S 04°22.26' W 077°35.60'	↘	35000	-43°C (+11°)		455	179°	179°	184°	441	70.0	4.2		0.0	
KUSKU S 05°01.15' W 077°30.88'	↘	35000	-43°C (+11°)		455	+0°	+5°	184°	439	30.5	2h26		0.0	
PUPMI S 05°40.80' W 077°28.99'	↘	35000	-43°C (+11°)		455	181°	189°	195°	438	102.6	14		0.0	
RELOR S 07°14.00' W 077°27.38'	↘	35000	-43°C (+12°)		455	-0°	+5°	195°	438	102.6	2h40		0.0	
RELOR S 07°14.00' W 077°27.38'	↘	35000	-43°C (+12°)		455	189°	189°	195°	438	102.6	44		0.0	
TOD S 10°20.48' W 077°18.34'	↘	35000	-43°C (+12°)		455	-1°	+5°	194°	441	321.6	3h24		0.0	
ILROL S 10°30.83' W 077°17.83'	↘	35000	-43°C (+11°)		455	177°	175°	179°	430	75.3	10		0.0	
JC601 S 10°42.47' W 077°21.00'	↘	35000	-42°C (+11°)		455	-1°	+4°	179°	434	149.0	3h34		0.0	
JC603 S 10°52.46' W 077°23.72'	↘	35000	-26°C (+15°)		423	177°	176°	179°	434	149.0	20		0.0	
KALAR S 11°14.75' W 077°29.81'	↘	35000	-18°C (+17°)		383	-1°	+4°	179°	434	149.0	3h55		0.0	
VUMOM S 11°36.98' W 077°18.87'	↘	35000	-3°C (+19°)		337	177°	177°	181°	431	85.4	12		0.0	
LOBUS S 11°47.81' W 077°13.51'	↘	35000	11°C (+17°)		315	-2°	+3°	179°	431	85.4	4h07		0.0	
SPJC S 12°01.31' W 077°06.86'	↘	35000	11°C (+17°)		315	177°	178°	180°	442	39.5	13		0.0	
SPJC S 12°01.31' W 077°06.86'	↘	35000	11°C (+17°)		315	+1°	+3°	182°	446	33.1	4h20		0.0	
SPJC S 12°01.31' W 077°06.86'	↘	35000	11°C (+17°)		315	177°	179°	182°	446	33.1	5.3		0.0	
SPJC S 12°01.31' W 077°06.86'	↘	35000	11°C (+17°)		315	+1°	+3°	182°	446	33.1	4h26		0.0	
SPJC S 12°01.31' W 077°06.86'	↘	35000	11°C (+17°)		315	177°	179°	182°	446	33.1	4.4		0.0	
SPJC S 12°01.31' W 077°06.86'	↘	35000	11°C (+17°)		315	+1°	+3°	182°	446	33.1	4h30		0.0	

Tabla 19. Waypoints ruta 14I. Skyvector

Fuente: Autores.

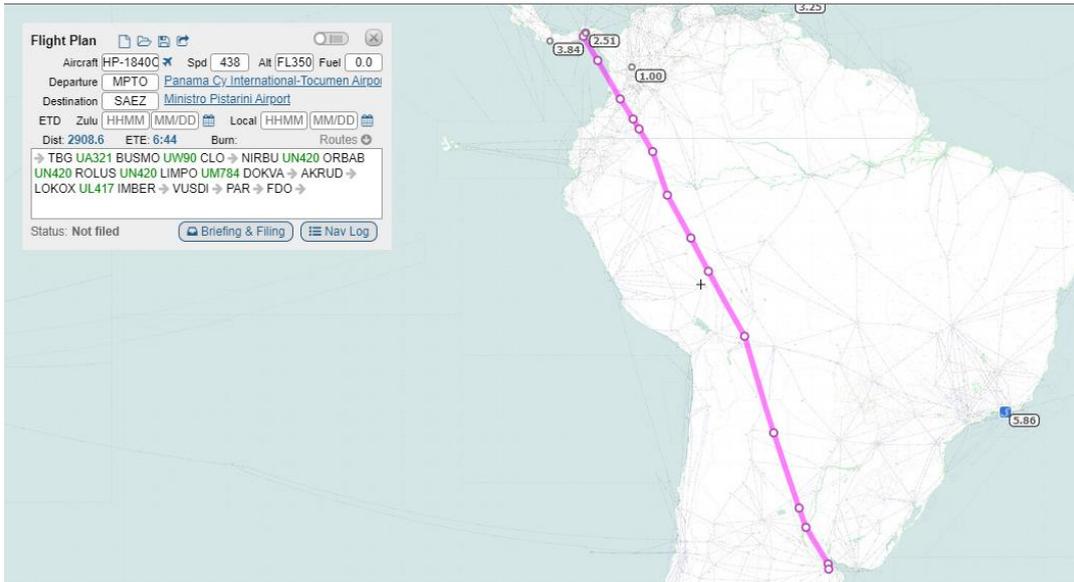


Figura 18. Plan de vuelo teórico ruta 151. Skyvector

Fuente: Autores.

Waypoint	Route	wDir	wSpd	TAS	Track	TH	MH	GS	Dist	ETE	ATE	Fuel	Fuel
	Albitude	Temp (dev)			WCA	Var				ETO	ATO	EFR	AFR
MPTO N 09°04.22 W 079°23.00	Ø	323°	5	292	212°	213°	217°	294	20.0	3.7		0.0	
TBG 110 N 08°47.25 W 079°33.72	UA321	88°	16	346	150°	147°	151°	338	64.9	9.4		0.0	
TOC N 07°51.01 W 079°00.68	UA321	164°	9	438	150°	150°	154°	429	24.8	3.5		0.0	
IRATA N 07°29.48 W 078°48.09	UA321	158°	11	438	149°	149°	152°	427	54.0	7.6		0.0	
BUSMO N 06°43.09 W 078°19.99	UW90	154°	14	438	150°	150°	153°	424	171.3	24		0.0	
ASIKO N 04°14.40 W 076°53.37	UW90	163°	22	438	150°	151°	154°	417	57.9	8.4		0.0	
CLO 115.5 N 03°24.12 W 076°24.33	Ø	159°	23	438	147°	148°	154°	415	122.6	18		0.0	
NIRBU N 01°40.52 W 073°18.12	UN420	169°	27	438	149°	150°	156°	413	59.0	8.6		0.0	
ORBAB N 00°49.71 W 074°47.78	UN420	167°	29	438	149°	150°	157°	410	136.5	20		0.0	
ROLUS S 07°07.88 W 073°37.00	UN420	154°	25	438	161°	161°	167°	413	236.5	34		0.0	
LIMPO S 04°53.00 W 072°21.99	UM784	198°	23	438	151°	154°	158°	422	118.3	17		0.0	
IVPON S 06°37.42 W 071°25.06	UM784	210°	19	438	151°	153°	160°	428	98.1	14		0.0	
IVSUP S 08°03.85 W 070°37.57	UM784	217°	22	438	151°	154°	161°	429	34.2	4.8		0.0	
DOKVA S 08°33.98 W 070°20.93	Ø	222°	26	438	152°	156°	163°	428	190.8	26		0.0	
AKRUD S 17°23.70 W 068°50.98	Ø	243°	18	438	151°	154°	161°	438	372.0	50		0.0	
LOKOX S 16°50.03 W 065°44.55	UL417	298°	14	438	163°	165°	173°	448	15.1	2.0		0.0	
DOLGI S 17°04.53 W 065°40.03	UL417	300°	14	438	163°	165°	173°	448	24.3	3.3		0.0	
VAREB S 17°27.88 W 065°32.77	UL417	295°	17	438	163°	165°	174°	449	12.8	1.7		0.0	
GELAS S 17°40.20 W 065°28.93	UL417	295°	17	438	164°	165°	174°	449	76.0	10		0.0	
VALUS S 18°53.38 W 065°06.17	UL417	295°	17	438	164°	165°	174°	449	76.0	10		0.0	

Waypoint	Route	wDir	wSpd	TAS	Track	TH	MH	GS	Dist	ETE	ATE	Fuel	Fuel
	Altitude	Temp (dev)			WCA	Var				ETO	ATO	EFR	AFR
△ VALUS S 18°53.38' W 065°06.17'	UL417	305°	25	438	164°	166°	174°	458	17.3	2.3		0.0	
△ EGUSU S 18°10.00' W 065°01.00'	UL417	304°	26	438	164°	166°	175°	458	110.0	4h28		0.0	
△ ASETO S 20°55.92' W 064°28.05'	UL417	319°	38	438	164°	166°	174°	472	26.4	14		0.0	
△ ESMUR S 21°31.38' W 064°20.12'	UL417	315°	38	438	164°	166°	175°	471	55.1	4h46		0.0	
△ PUBUM S 22°14.50' W 064°03.60'	UL417	309°	45	438	163°	166°	174°	475	149.1	19		0.0	
△ IMBER S 24°31.40' W 063°15.47'	∅→	293°	53	438	162°	167°	174°	472	363.8	5h12		0.0	
△ VUSDI S 30°22.58' W 061°04.35'	∅→	270°	54	438	161°	167°	176°	453	27.7	47		0.0	
∇ TOD S 30°49.21' W 060°53.65'	∅→	267°	54	438	161°	167°	176°	453	27.7	5h59		0.0	
⊙ PAR 116.8 S 31°48.50' W 060°29.08'	∅→	266°	53	467	161°	167°	175°	480	62.8	3.7		0.0	
⊙ FDO 114.4 S 34°17.09' W 058°35.04'	∅→	266°	53	441	149°	154°	160°	451	185.0	6h03		0.0	
⊙ SAEZ S 34°49.33' W 058°32.15'	∅→	258°	34	311	174°	175°	182°	313	22.3	8.1		0.0	
										6h11		0.0	
										29		0.0	
										6h40		0.0	
										4.5		0.0	
										6h44		0.0	

Tabla 20. Waypoints ruta 15I. Skyvector

Fuente: Autores.

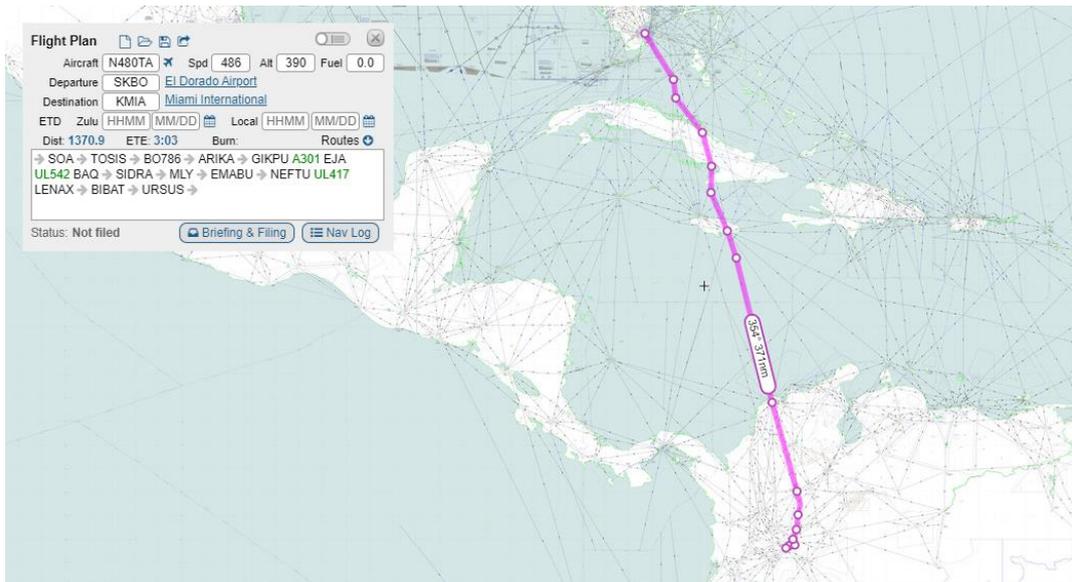


Figura 19. Plan de vuelo teórico ruta 16I. Skyvector

Fuente: Autores.

Waypoint	Route	wDir	wSpd	TAS	Track WCA	TH Var	MH	GS	Dist	ETE		Fuel	
										ETO	ATE ATO	EFR	AFR
SKBO N 04°42.10' W 074°08.82'	↘	147°	5	267	232°	231°	238°	266	9.6	2.1		0.0	
SOA 108.6 N 04°36.18' W 074°16.58'	↘	153°C (+17°)			-1°	+8°				2.1		0.0	
TOSIS N 04°36.18' W 074°16.58'	↘	113°	11	286	71°	72°	80°	277	23.7	4.8		0.0	
BO786 N 04°43.94' W 073°53.92'	↘	4°C (+16°)			+1°	+7°				6.8		0.0	
ARIKA N 05°13.70' W 073°49.90'	↘	53°	7	334	342°	344°	350°	332	15.4	2.7		0.0	
TOC N 05°46.06' W 073°47.25'	↘	-13°C (+17°)			+1°	+7°				9.5		0.0	
GIKPU N 05°14.51' W 073°43.43'	↘	109°	9	361	19°	21°	28°	361	26.4	4.1		0.0	
YACAR N 05°28.88' W 073°28.78'	↘	-24°C (+16°)			+2°	+7°				14		0.0	
LOURA N 05°41.51' W 073°43.50'	↘	171°	16	401	7°	7°	14°	416	22.4	3.1		0.0	
EJA 115.9 N 07°17.72' W 074°48.33'	↘	-42°C (+11°)			+1°	+7°				17		0.0	
DAGAN N 07°58.15' W 074°04.18'	↘	188°	23	486	7°	7°	14°	509	15.4	1.8		0.0	
BAQ 113.7 N 10°47.72' W 074°31.62'	↘	-54°C (+3°)			-0°	+7°				19		0.0	
SIDRA N 10°49.10' W 074°23.63'	↘	189°	22	486	12°	12°	19°	508	27.9	3.3		0.0	
MLY N 17°55.81' W 076°46.66'	↘	-54°C (+3°)			+0°	+8°				22		0.0	
EMABU N 19°29.38' W 077°28.65'	↘	191°	20	486	345°	344°	352°	504	13.0	1.5		0.0	
NEFTU N 20°13.00' W 077°26.82'	↘	-54°C (+2°)			-1°	+8°				23		0.0	
IKMIL N 20°59.90' W 077°34.53'	↘	191°	19	486	345°	344°	352°	503	20.8	2.5		0.0	
TOD N 21°10.11' W 077°37.49'	↘	-54°C (+2°)			-1°	+8°				26		0.0	
LENAX N 21°33.97' W 077°50.18'	↘	192°	17	486	345°	344°	352°	501	59.3	7.1		0.0	
BIBAT N 23°16.37' W 078°58.57'	↘	-54°C (+2°)			-1°	+8°				33		0.0	
BIBAT N 23°16.37' W 078°58.57'	↘	199°	15	486	344°	343°	350°	498	174.2	21		0.0	
URSUS N 24°00.00' W 079°04.19'	↘	-54°C (+3°)			-1°	+6°				54		0.0	
KMIA N 25°47.72' W 080°17.41'	↘	249°	22	486	346°	344°	352°	488	370.8	47		0.0	
	↘	-54°C (+2°)			-3°	+8°				1h41		0.0	
	↘	298°	29	486	342°	339°	347°	465	70.0	9.1		0.0	
	↘	-54°C (+2°)			-2°	+8°				1h50		0.0	
	↘	303°	25	486	337°	335°	342°	465	101.3	13		0.0	
	↘	-55°C (+2°)			-2°	+7°				2h03		0.0	
	↘	331°	22	486	1°	0°	8°	467	63.4	8.2		0.0	
	↘	-55°C (+1°)			-1°	+8°				2h11		0.0	
	↘	340°	31	486	345°	345°	352°	455	27.8	3.7		0.0	
	↘	-56°C (+0°)			-0°	+8°				2h15		0.0	
	↘	339°	31	486	345°	345°	352°	455	10.6	1.4		0.0	
	↘	-56°C (+1°)			-0°	+8°				2h16		0.0	
	↘	338°	31	460	345°	344°	352°	428	45.2	6.3		0.0	
	↘	-56°C (+1°)			-0°	+8°				2h22		0.0	
	↘	338°	31	473	323°	325°	332°	437	103.7	14		0.0	
	↘	-55°C (+1°)			+2°	+8°				2h36		0.0	
BIBAT N 27°16.57' W 078°58.57'	↘	346°	39	447	353°	353°	0°	431	43.8	6.3		0.0	
	↘	-43°C (+9°)			-1°	+7°				2h42		0.0	
	↘	337°	16	414	328°	328°	336°	408	126.3	20		0.0	
	↘	-15°C (+14°)			+0°	+7°				3h03		0.0	

Tabla 21. Waypoints ruta 16I. Skyvector

Fuente: Autores.

ESPACIO INTENCIONALMENTE DEJADO EN BLANCO

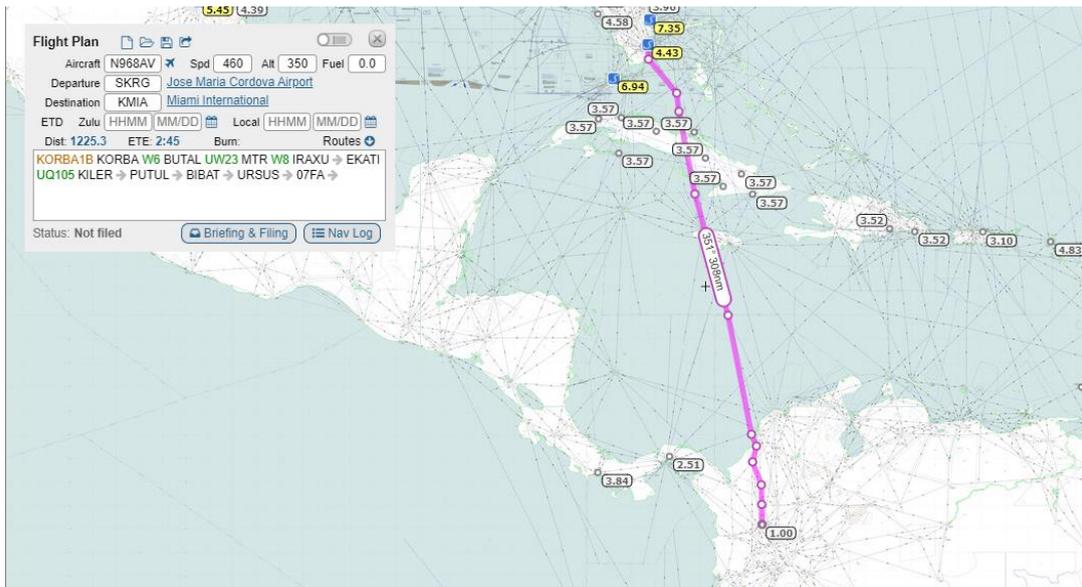


Figura 20. Plan de vuelo teórico ruta 17I. Skyvector

Fuente: Autores.

Waypoint	Route	Altitude	wDir	wSpd	TAS	Track WCA	TH Var	MH	GS	Dist	ETE ETO	ATE ATO	Fuel EFR	Fuel AFR
SKRG	KORBA1B	133°	3	18°C (+17°)	315	1° +0°	2° +7°	9°	317	2.6	0.5		0.0	
LI	KORBA1B	128°	5	15°C (+16°)	321	357° +1°	358° +5°	3°	324	6.5	1.2		0.0	
D005T	KORBA1B	126°	11	8°C (+16°)	336	359° +1°	0° +7°	7°	343	42.1	6.6		0.0	
KORBA	W6	170°	7	-26°C (+15°)	434	359° +0°	359° +6°	5°	441	25.1	3.2		0.0	
TOC	W6	180°	20	-44°C (+11°)	460	-0° +0°	+6° +6°	5°	480	24.7	3.1		0.0	
BUTAL	UW23	182°	21	-44°C (+11°)	460	339° -1°	338° +6°	344°	479	62.6	7.8		0.0	
MTR	W8	190°	19	-44°C (+11°)	460	14° +0°	14° +7°	21°	479	41.2	5.2		0.0	
IRAXU	-D+	204°	17	-44°C (+11°)	460	337° -2°	335° +6°	342°	471	32.2	4.1		0.0	
EKATI	UQ105	218°	16	-44°C (+11°)	460	349° -1°	347° +5°	353°	470	304.4	40		0.0	
KILER	-D+	289°	19	-44°C (+11°)	460	345° -2°	343° +6°	349°	449	308.2	1h12		0.0	
PUTUL	-D+	349°	29	-46°C (+8°)	460	349° -0°	349° +6°	355°	431	71.8	10		0.0	
TOD	-D+	347°	31	-46°C (+8°)	469	349° -0°	349° +6°	355°	439	128.9	2h03		0.0	
BIBAT	-D+	346°	32	-46°C (+8°)	503	353° -0°	353° +7°	0°	489	43.8	5.3		0.0	
URSUS	-D+	339°	14	-13°C (+14°)	491	320° +0°	321° +7°	328°	486	103.0	2h26		0.0	
07FA	-D+	334°	5	-4°C (+15°)	278	358° +2°	1° +7°	8°	277	28.2	14		0.0	
Kmia											2h39		0.0	
											6.4		0.0	
											2h45		0.0	

Tabla 22. Waypoints ruta 17I. Skyvector

Fuente: Autores.

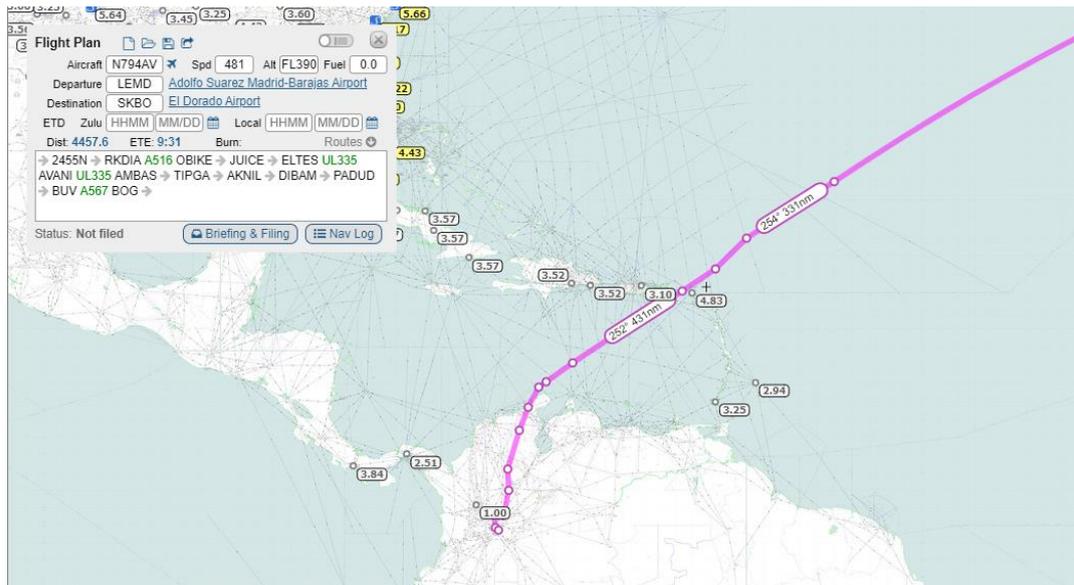


Figura 21. Plan de vuelo teórico ruta 181. Skyvector

Fuente: Autores.

Waypoint	Route	wDir	wSpd	TAS	Track		MH	GS	Dist	ETE	ATE	Fuel	Fuel
					WCA	Var							
LEMD N 40°28.33' W 003°33.65'	Ø	286°	19	321	265°	266°	267°	304	76.4	13		0.0	
TOC	↘	10°C (-1°)			+1°	+1°				13		0.0	
2455N N 40°21.332' W 005°13.19'	Ø	280°	72	481	264°	266°	267°	411	2677.3	5h35		0.0	
2455N N 24°00.000' W 055°00.000'	Ø	-51°C (+5°)			+2°	+1°				5h48		0.0	
RKDIA N 21°00.000' W 060°00.000'	A516	315°	29	481	225°	229°	244°	480	140.6	18		0.0	
OBIKE N 19°20.487' W 061°46.033'	Ø	-58°C (-1°)			+2°	+16°				6h29		0.0	
JUICE N 18°07.897' W 063°40.000'	Ø	306°	27	481	237°	240°	254°	471	130.1	17		0.0	
ELTES N 18°00.000' W 063°40.000'	Ø	-56°C (+1°)			+3°	+15°				7h03		0.0	
ATUBI N 14°04.837' W 069°59.555'	Ø	291°	31	481	238°	241°	255°	461	431.4	58		0.0	
GREEV N 14°00.833' W 070°08.388'	UL335	-55°C (+2°)			+3°	+14°				8h01		0.0	
KEMSU N 13°49.933' W 070°24.007'	UL335	268°	35	481	235°	237°	248°	451	5.6	0.7		0.0	
GADAN N 13°23.133' W 071°02.477'	UL335	-54°C (+3°)			+2°	+11°				8h01		0.0	
EXXIT N 13°19.333' W 071°07.590'	UL335	268°	34	481	235°	237°	248°	452	10.5	1.4		0.0	
AVANI N 12°49.000' W 071°51.000'	UL335	-54°C (+3°)			+2°	+11°				8h03		0.0	
AMBAS N 12°49.000' W 071°51.000'	UL335	268°	33	481	235°	237°	248°	453	18.7	2.5		0.0	
TIPGA N 11°41.000' W 072°27.133'	UL335	-54°C (+3°)			+2°	+11°				8h05		0.0	
AKNIL N 10°23.223' W 073°57.225'	UL335	264°	36	481	235°	237°	247°	449	45.9	6.2		0.0	
TOD N 08°33.844' W 073°29.666'	UL335	-54°C (+3°)			+2°	+11°				8h11		0.0	
DIBAM N 08°11.000' W 073°37.100'	UL335	261°	37	481	234°	236°	247°	448	6.5	0.9		0.0	
PADUD N 06°58.666' W 073°33.666'	UL335	-54°C (+3°)			+2°	+10°				8h12		0.0	
BUVA567 N 05°31.933' W 073°51.533'	Ø	262°	36	481	234°	236°	247°	449	21.3	2.8		0.0	
	Ø	-54°C (+3°)			+2°	+10°				8h15		0.0	
	Ø	263°	36	481	234°	236°	247°	449	30.5	4.1		0.0	
	Ø	-54°C (+3°)			+2°	+10°				8h19		0.0	
	Ø	260°	35	481	208°	211°	221°	459	76.4	10		0.0	
	Ø	-54°C (+3°)			+3°	+10°				8h29		0.0	
	Ø	256°	28	481	201°	204°	213°	464	82.9	11		0.0	
	Ø	-54°C (+3°)			+3°	+9°				8h40		0.0	
	Ø	232°	21	481	197°	198°	206°	463	111.6	15		0.0	
	Ø	-53°C (+3°)			+1°	+8°				8h54		0.0	
	Ø	198°	21	462	197°	197°	204°	441	25.8	3.5		0.0	
	Ø	-53°C (+3°)			+0°	+8°				8h58		0.0	
	Ø	197°	22	471	177°	178°	184°	452	72.1	9.3		0.0	
	Ø	-52°C (+4°)			+1°	+6°				9h07		0.0	
	Ø	195°	20	474	192°	192°	200°	470	88.2	12		0.0	
	Ø	-45°C (+11°)			-0°	+8°				9h19		0.0	

Waypoint	Route	wDir	wSpd	TAS	Track		MH	GS	Dist	ETE		Fuel	
					WCA	TH Var				ETO	ATO	EFR	AFR
BUV 116.2 N 05°31.53' W 073°51.52'	A567	185°	4	411	246°	246°	253°	415	16.3	2.4		0.0	
GEPSO N 05°25.18' W 074°06.37'	A567	36°	5	398	246°	245°	253°	403	18.4	9h21		0.0	
VULAM N 05°17.53' W 074°23.15'	A567	81°	5	385	172°	171°	177°	382	26.9	9h24		0.0	
BOG 113.9 N 04°50.80' W 074°19.40'	A567	104°	8	365	129°	129°	137°	360	13.7	9h28		0.0	
SKBO N 04°42.10' W 074°08.82'	A567	2°	8	365	-0°	+7°	137°	360	13.7	9h31		0.0	

Tabla 23. Waypoints ruta 18I. Skyvector

Fuente: Autores.

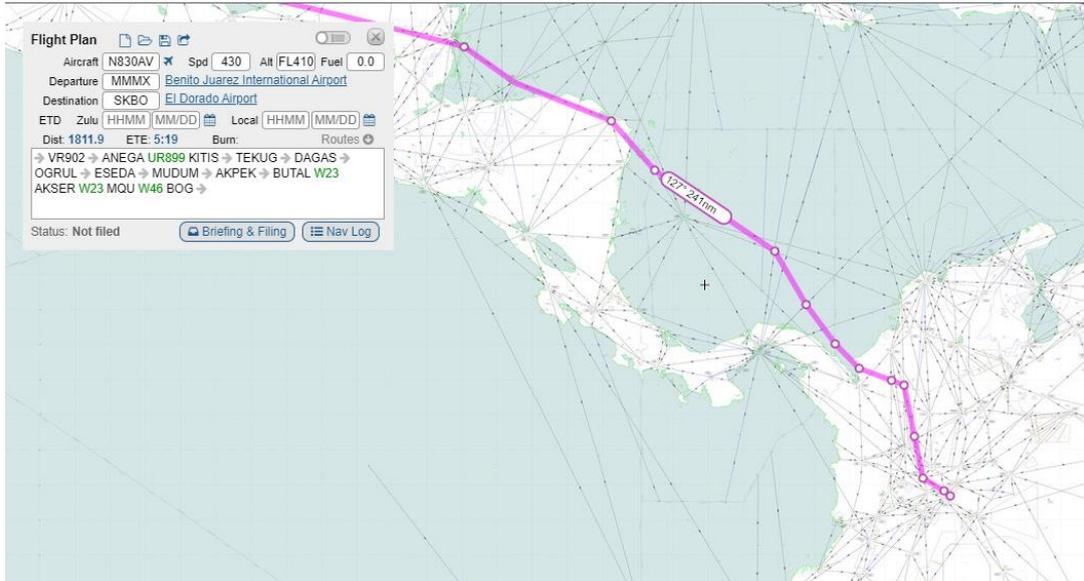


Figura 22. Plan de vuelo teórico ruta 19I. Skyvector

Fuente: Autores.

ESPACIO INTENCIONALMENTE DEJADO EN BLANCO

Waypoint	Route	wDir	wSpd	TAS	Track WCA	TH Var	MH	GS	Dist	ETE	ATE	Fuel	Fuel
										ETO	ATO	EFR	AFR
MMMX N 19°24.18' W 099°04.32'	∅	0°	4	82	95°	92°	86°	83	96.8	55		0.0	
TOC N 19°12.57' W 097°22.32'	∅	16°C (+15°)	5		-3°	-6°				55		0.0	
VR902 N 19°10.95' W 096°10.78'	41000	∅	208°	430	95°	96°	90°	432	68.0	1h04		0.0	
ANEGA N 17°17.82' W 087°57.55'	41000	∅	254°	430	102°	102°	99°	433	482.7	1h07		0.0	
KIRAP N 17°03.38' W 087°56.38'	UR899	∅	333°	430	125°	125°	123°	437	24.8	2h11		0.0	
ROA 117.6 N 16°18.99' W 080°23.15'	41000	∅	-60°C (-4°)	430	-0°	-2°	123°	438	76.5	2h25		0.0	
AGUAN N 15°53.96' W 080°23.78'	UR899	∅	325°	430	111°	111°	112°	436	67.8	9.3		0.0	
DAVRO N 15°53.96' W 080°23.78'	41000	∅	-60°C (-4°)	430	-1°	+1°	112°	435	44.5	2h34		0.0	
DAVRO N 15°53.96' W 080°23.78'	UR899	∅	318°	430	112°	111°	111°	435	44.5	6.1		0.0	
KITIS N 15°53.57' W 080°46.72'	41000	∅	-60°C (-3°)	430	-0°	-0°	112°	435	58.4	2h40		0.0	
TEKUG N 15°53.57' W 080°46.72'	UR899	∅	289°	430	112°	112°	112°	435	58.4	8.1		0.0	
DAGAS N 15°53.57' W 080°46.72'	41000	∅	-60°C (-3°)	430	+0°	-0°	112°	435	58.4	2h48		0.0	
DAGAS N 15°53.57' W 080°46.72'	UR899	∅	275°	430	138°	139°	141°	436	108.6	15		0.0	
OGRUL N 15°53.57' W 080°46.72'	41000	∅	-60°C (-3°)	430	+1°	+2°	141°	436	108.6	3h03		0.0	
OGRUL N 15°53.57' W 080°46.72'	UR899	∅	252°	430	124°	124°	128°	433	241.3	33		0.0	
ESEDA N 15°53.57' W 080°46.72'	41000	∅	-60°C (-3°)	430	+1°	+4°	128°	433	241.3	3h37		0.0	
MUDUM N 15°53.57' W 080°46.72'	UR899	∅	232°	430	150°	152°	157°	427	104.2	15		0.0	
MUDUM N 15°53.57' W 080°46.72'	41000	∅	-59°C (-3°)	430	+2°	+5°	157°	427	104.2	3h51		0.0	
AKPEK N 15°53.57' W 080°46.72'	UR899	∅	231°	430	144°	145°	149°	430	82.3	11		0.0	
BUTAL N 15°53.57' W 080°46.72'	41000	∅	-59°C (-3°)	430	+1°	+4°	149°	430	82.3	4h03		0.0	
BUTAL N 15°53.57' W 080°46.72'	UR899	∅	225°	430	135°	136°	142°	430	58.0	8.1		0.0	
LOLUS N 15°53.57' W 080°46.72'	41000	∅	-59°C (-3°)	430	+1°	+6°	142°	430	58.0	4h11		0.0	
LOLUS N 15°53.57' W 080°46.72'	UR899	∅	211°	430	110°	112°	117°	432	58.2	8.1		0.0	
AKSER N 15°53.57' W 080°46.72'	41000	∅	-59°C (-2°)	430	+2°	+5°	117°	432	58.2	4h19		0.0	
MUGOP N 15°53.57' W 080°46.72'	UR899	∅	204°	430	110°	113°	118°	431	22.8	3.2		0.0	
MUGOP N 15°53.57' W 080°46.72'	41000	∅	-59°C (-2°)	430	+2°	+5°	118°	431	22.8	4h22		0.0	
TOD N 15°53.57' W 080°46.72'	W23	∅	203°	430	169°	170°	176°	417	50.7	7.3		0.0	
TOD N 15°53.57' W 080°46.72'	41000	∅	-59°C (-2°)	430	+1°	+6°	176°	417	50.7	4h30		0.0	
TOD N 15°53.57' W 080°46.72'	UR899	∅	200°	430	169°	170°	176°	418	38.0	5.5		0.0	
TOD N 15°53.57' W 080°46.72'	41000	∅	-59°C (-2°)	430	+1°	+6°	176°	418	38.0	4h35		0.0	
TOD N 15°53.57' W 080°46.72'	UR899	∅	200°	430	169°	170°	176°	419	33.6	4.8		0.0	
TOD N 15°53.57' W 080°46.72'	41000	∅	-59°C (-2°)	430	+1°	+6°	176°	419	33.6	4h40		0.0	
TOD N 15°53.57' W 080°46.72'	UR899	∅	202°	430	169°	170°	176°	419	1.9	0.3		0.0	
TOD N 15°53.57' W 080°46.72'	41000	∅	-58°C (-2°)	430	+1°	+6°	176°	419	1.9	4h40		0.0	

Waypoint	Route	wDir	wSpd	TAS	Track WCA	TH Var	MH	GS	Dist	ETE	ATE	Fuel	Fuel
										ETO	ATO	EFR	AFR
TOD N 05°48.86' W 075°02.78'	W23	∅	201°	199	169°	171°	177°	187	37.0	14		0.0	
MQU 116.1 N 05°12.43' W 074°55.45'	W46	∅	-58°C (-2°)	161	+2°	+6°	127°	152	41.9	4h54		0.0	
BOG 113.9 N 04°50.80' W 074°19.40'	∅	∅	198°	126	121°	121°	127°	152	41.9	18		0.0	
SKBO N 04°42.10' W 074°08.82'	∅	∅	-57°C (-1°)	126	+0°	+6°	127°	152	41.9	5h12		0.0	
SKBO N 04°42.10' W 074°08.82'	∅	∅	129°	126	129°	128°	135°	119	13.7	7.1		0.0	
SKBO N 04°42.10' W 074°08.82'	∅	∅	-27°C (+15°)	126	-2°	+7°	135°	119	13.7	5h19		0.0	

Tabla 24. Waypoints ruta 19I. Skyvector

Fuente: Autores.

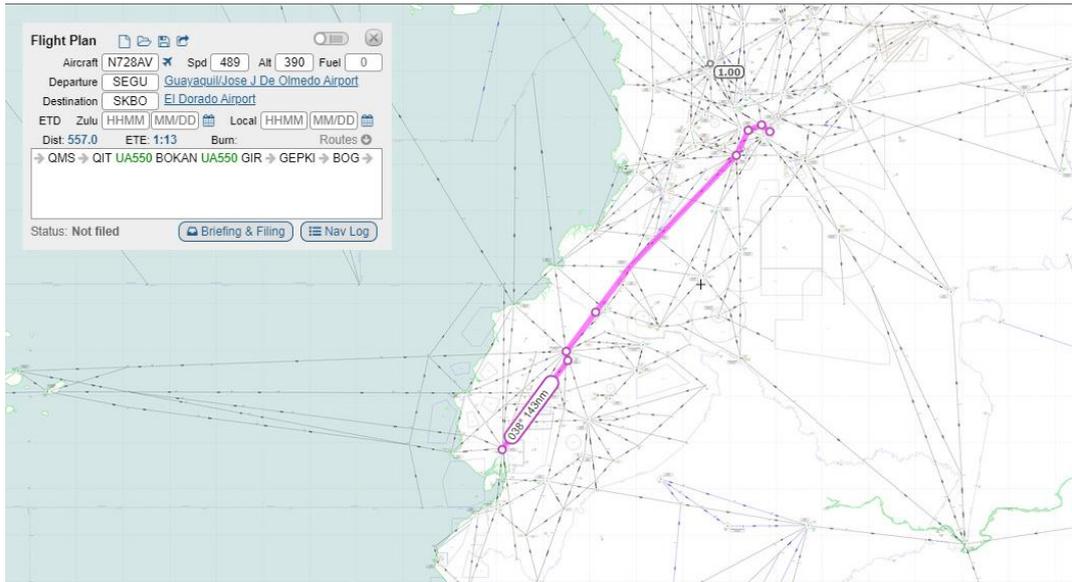


Figura 23. Plan de vuelo teórico ruta 20I. Skyvector

Fuente: Autores.

Waypoint	Route	wDir	wSpd	TAS	Track WCA	TH Var	MH	GS	Dist	ETE ETO	ATE ATO	Fuel EFR	Fuel AFR
SEGU S 02°09.41' W 079°53.03'	-D-	217°	2	326	36°	36°	38°	327	113.9	16		0.0	
TOC S 00°37.32' W 078°45.62'	-D-	201°	26	489	36°	37°	39°	514	28.6	3.3		0.0	
QMS 114.8 S 00°14.14' W 078°28.67'	-D-	199°	27	489	350°	349°	351°	512	11.9	1.4		0.0	
QIT 115.3 S 00°02.31' W 078°30.68'	-D-	189°	27	489	37°	38°	42°	513	40.1	4.7		0.0	
ARNOK N 00°29.92' W 078°05.68'	UA550	189°	27	489	37°	38°	42°	513	23.1	2.7		0.0	
BOKAN N 00°48.52' W 077°52.83'	UA550	182°	29	489	37°	39°	43°	512	73.1	8.6		0.0	
MER 116.3 N 01°47.20' W 077°50.95'	UA550	177°	31	489	44°	46°	49°	510	0.1	0.0		0.0	
TOD N 01°47.25' W 077°50.90'	UA550	177°	31	462	44°	46°	49°	482	69.9	8.7		0.0	
ISKED N 02°38.18' W 076°20.77'	UA550	176°	32	481	44°	46°	51°	485	18.9	45		0.0	
ESARO N 02°51.90' W 076°07.68'	UA550	146°	18	486	44°	45°	49°	486	82.9	2.3		0.0	
MUGBU N 03°52.13' W 075°10.40'	UA550	135°	14	432	44°	44°	50°	424	26.7	47		0.0	
GIR 117.3 N 04°11.50' W 074°51.95'	-D-	-30°C (+14°)			+2°	+4°				11		0.0	
GEPKI N 04°43.60' W 074°36.63'	-D-	59°	9	412	26°	26°	31°	405	35.4	58		0.0	
BOG 113.9 N 04°50.80' W 074°19.40'	-D-	-10°C (+17°)			+0°	+5°				3.9		0.0	
SKBO N 04°42.10' W 074°08.82'	-D-	50°	9	386	67°	69°	75°	377	18.6	1h02		0.0	
	-D-	-3°C (+17°)			+1°	+6°				5.4		0.0	
	-D-	108°	12	373	129°	129°	137°	364	13.7	1h08		0.0	
	-D-	4°C (+17°)			-0°	+7°				3.0		0.0	
	-D-									2.3		0.0	
	-D-									1h11		0.0	
	-D-									1h13		0.0	

Tabla 25. Waypoints ruta 20I. Skyvector

Fuente: Autores.

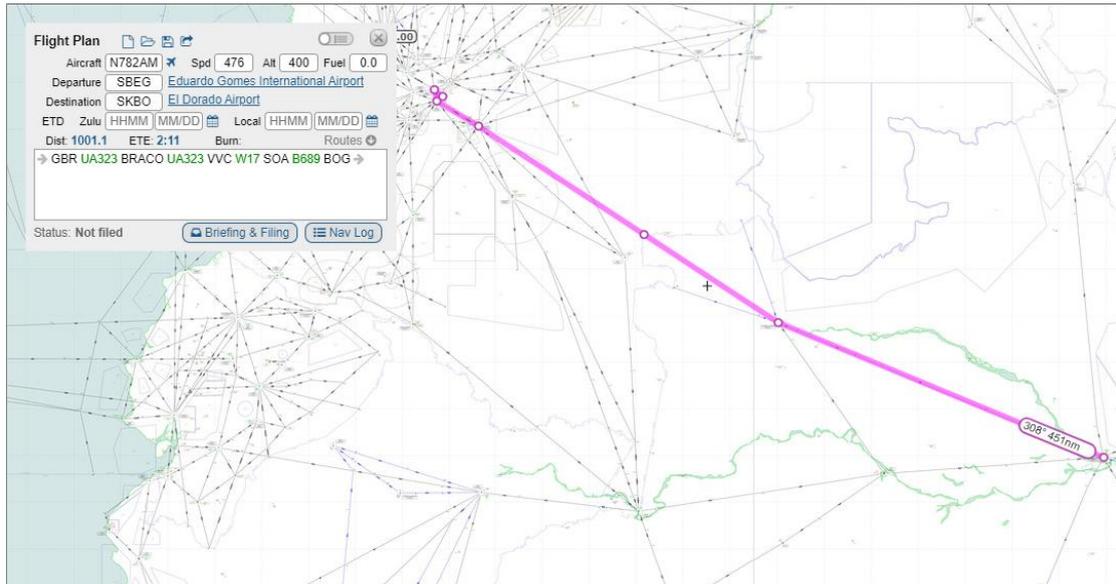


Figura 24. Plan de vuelo teórico ruta 21I. Skyvector

Fuente: Autores.

Waypoint	Route	wDir	wSpd	TAS	Track	TH	MH	GS	Dist	ETE	ATE	Fuel	Fuel
	Altitude	Temp (dev)			WCA	Var				ETO	ATO	EFR	AFR
SBEG S 03°02.47' W 060°03.03'	-D+	102°	3	298	292°	292°	308°	301	141.5	21		0.0	
TOC S 02°08.25' W 062°13.14'	-D+	212°	15	476	292°	291°	307°	473	309.8	39		0.0	
GBR 116.6 S 00°09.02' W 065°09.43'	UA323	207°	23	476	303°	301°	312°	478	205.8	1h00		0.0	
BRACO N 01°44.53' W 065°51.18'	UA323	212°	21	476	303°	301°	311°	476	243.5	1h26		0.0	
TOD N 03°38.67' W 073°14.38'	UA323	194°	25	453	303°	300°	310°	461	9.7	1h57		0.0	
VVC 116.7 N 04°04.02' W 073°22.93'	W17	192°	25	462	301°	298°	306°	473	20.0	1h58		0.0	
EGEPI N 04°14.37' W 073°40.10'	W17	182°	23	469	301°	300°	306°	479	19.5	2h00		0.0	
MAKTO N 04°24.47' W 073°56.88'	W17	159°	13	433	301°	302°	309°	442	22.7	2h03		0.0	
SOA 108.6 N 04°36.18' W 074°16.38'	B689	86°	12	389	348°	349°	356°	384	14.9	2h06		0.0	
BOG 113.9 N 04°50.80' W 074°19.40'	-D+	34°	7	359	129°	129°	136°	350	13.7	2h08		0.0	
SKBO N 04°42.10' W 074°08.82'	-D+	34°	7	359	129°	129°	136°	350	13.7	2h11		0.0	

Tabla 26. Waypoints ruta 21I. Skyvector

Fuente: Autores.

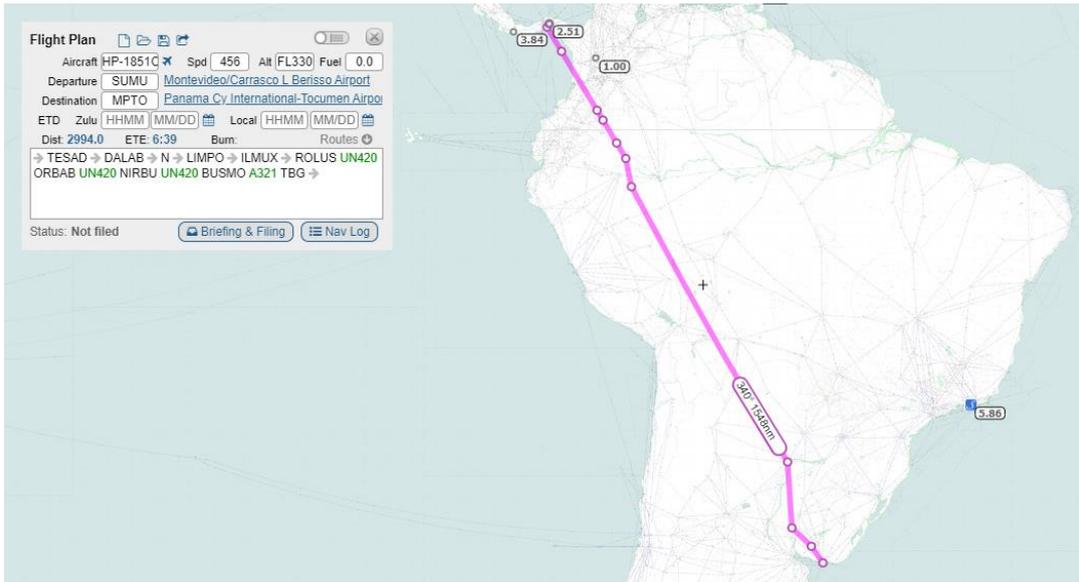


Figura 25. Plan de vuelo teórico ruta 221. Skyvector

Fuente: Autores.

Waypoint	Route	wDir	wSpd	TAS	Track	TH	MH	GS	Dist	ETE	ATE	Fuel	Fuel
	Altitude	Temp (dev)			WCA	Var				ETO	ATO	EFR	AFR
SUMU		272°	16	284	325°	322°	332°	274	74.2	12		0.0	
TOC		263°	41	456	325°	321°	331°	435	11.6	1.6		0.0	
TESAD	33000	-49°C (+2°)		456	313°	309°	320°	429	115.3	16		0.0	
DALAB	33000	-48°C (+2°)		456	356°	350°	358°	456	294.5	40		0.0	
N	262	-47°C (+4°)		456	-6°	+7°				1h10		0.0	
LIMPO	33000	-41°C (+10°)		456	328°	322°	334°	403	1548.0	3h30		0.0	
ILMUX	33000	-37°C (+13°)		456	349°	348°	352°	476	147.5	18		0.0	
ROLUS	33000	-37°C (+13°)		456	330°	329°	336°	482	92.2	4h58		0.0	
ORBAB	UN420	-37°C (+13°)		456	329°	329°	335°	482	136.5	17		0.0	
NIRBU	UN420	-37°C (+13°)		456	-0°	+6°				5h27		0.0	
TOD	UN420	-38°C (+13°)		456	329°	329°	335°	483	207.0	7.3		0.0	
BUSMO	A321	-38°C (+12°)		478	329°	329°	335°	496	144.6	6h00		0.0	
IRATA	A321	-38°C (+12°)		511	329°	329°	332°	511	54.0	17		0.0	
TBG	A321	-4°C (+18°)		478	330°	331°	334°	482	89.7	6h18		0.0	
MPTO		6°C (+17°)		414	32°	31°	35°	403	20.0	6h36		0.0	

Tabla 27. Waypoints ruta 221. Skyvector

Fuente: Autores.

Apéndice D

Cuarto Apéndice

RadioMobile:

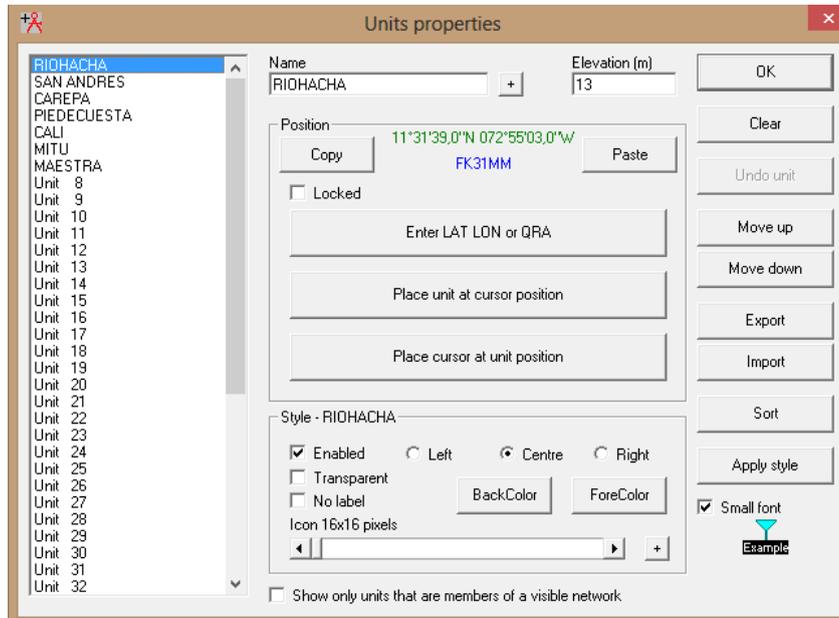


Figura 23. Propiedades de las antenas de referencia.

Fuente: Autores.

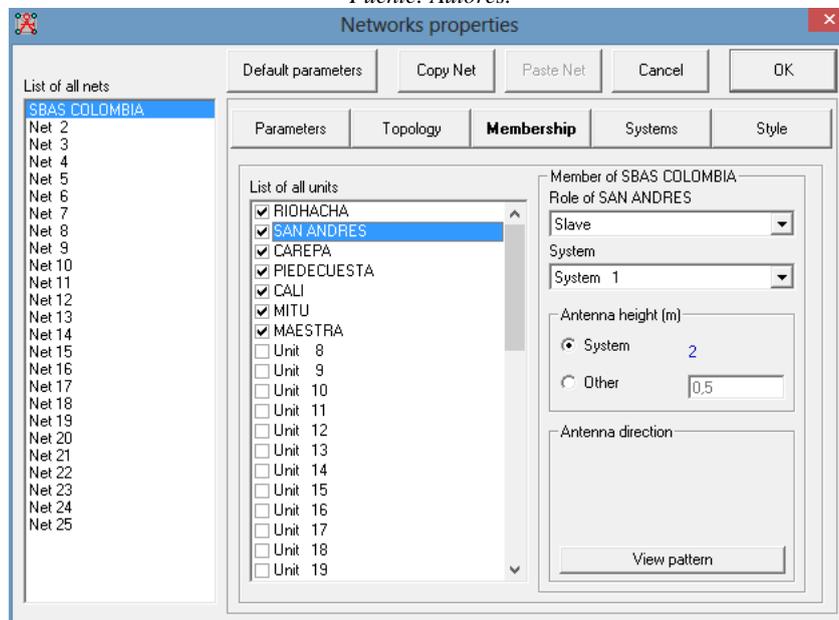


Figura 27. Configuración de las seis estaciones de referencia y una estación maestra.

Fuente: Autores

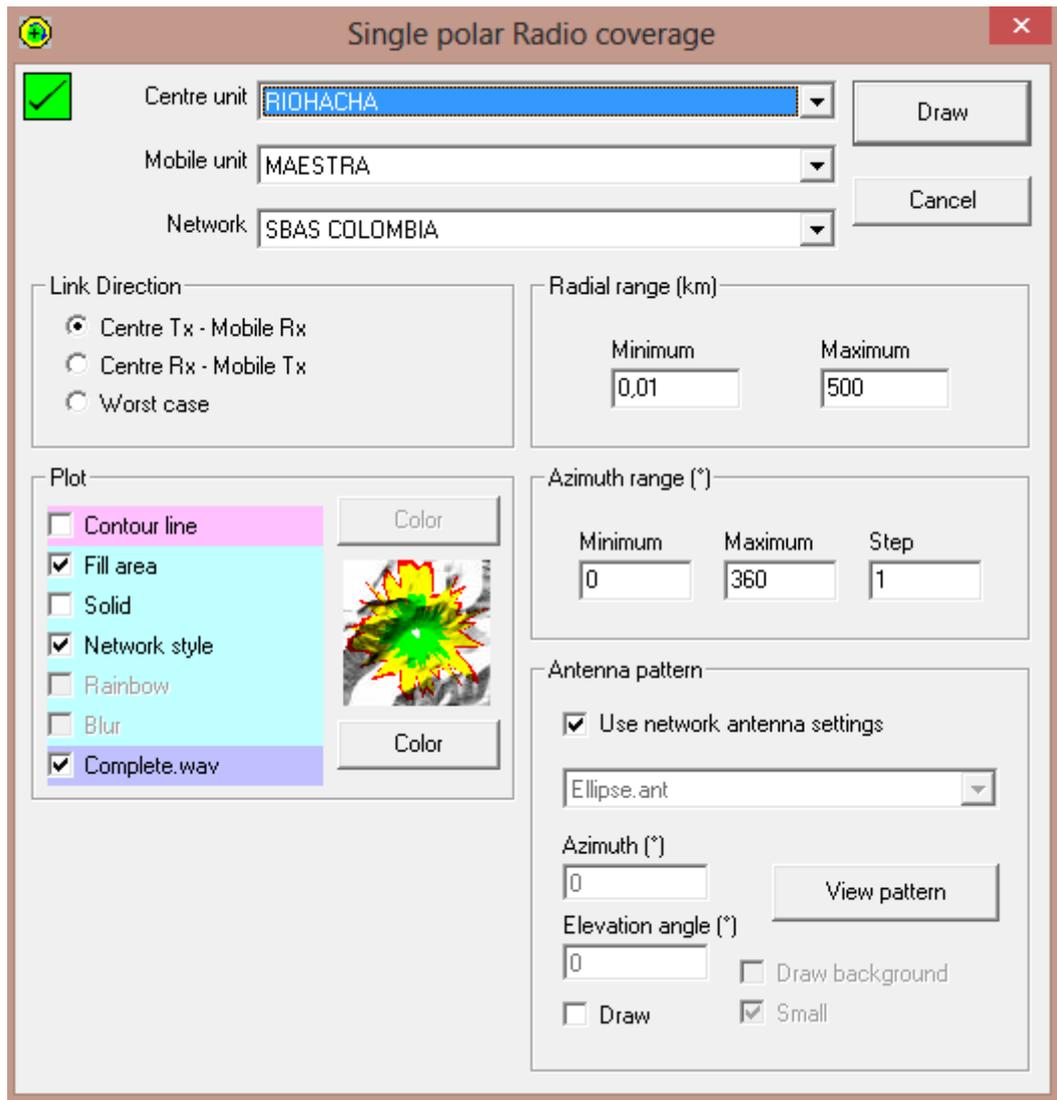


Figura 28. Configuración del radio de cobertura de recepción de las seis antenas de referencia.
Fuente: Autores.

Apéndice E

Quinto Apéndice

Simulación STK:

Position

Type: Geodetic

Latitude: 11.5449 deg

Longitude: -72.9063 deg

Altitude: -0.00932005 km Use terrain data

Altitude Reference: WGS84

Height Above Ground: 0 km

Local Time offset from GMT: -18000 sec

Figura 29. Propiedades antenas RIMS. STK
Fuente: Autores.

Sensor Type: Simple Conic

Simple Conic

Cone Half Angle: 90 deg

Figura 30. Descripción Sensores RIMS. STK
Fuente: Autores.

Pointing Type: Fixed

Fixed

Orientation Method: Az-EI

Azimuth: 0 deg

Elevation: 90 deg

About Boresight: Rotate

Figura 21. Descripción Sensores RIMS. STK
Fuente: Autores.

Interval:	SBASSATELITE AnalysisInterval		
Step Size:	60 sec		
Orbit Epoch:	22 Oct 2019 17:00:00.000 UTCG	Semimajor Axis	42164 km
Coord Epoch:	1 Jan 2000 11:58:55.816 UTCG	Eccentricity	0.0004277
Coord Type:	Classical	Inclination	4.31 deg
Coord System:	ICRF	Argument of Perigee	203.06 deg
Prop Specific:	Special Options...	RAAN	347.199 deg
		Mean Anomaly	172.325 deg

Figura 32. Propiedades órbita satélite SBAS. STK
Fuente: Autores.

Sensor Type:	Simple Conic
Simple Conic	
Cone Half Angle:	4.5 deg

Figura 33. Descripción Sensor satélite SBAS. STK
Fuente: Autores.

Pointing Type:	Fixed
Fixed	
Orientation Method:	Az-EI
Azimuth:	90 deg
Elevation:	90 deg
About Boresight:	Rotate

Figura 34. Descripción Sensor Satélite SBAS. STK
Fuente: Autores.