



Vigesimoprimer Reunión del Grupo Regional de Planificación y Ejecución del Caribe y Sudamérica (GREPECAS/21)

Santo Domingo, República Dominicana, 15 al 17 de noviembre de 2023

**Cuestión 3 del
Orden del Día:**

Desarrollos globales y regionales

3.3 Nivel de Implementación de los Servicios de Navegación Aérea (ANS) CAR/SAM

EVOLUCIÓN DE LA GNSS EN REGIONES DE BAJA LATITUD

(Presentada por Brasil)

RESUMEN EJECUTIVO

Este documento aborda cuestiones relacionadas con el Sistema Mundial de Navegación por Satélite (GNSS), más concretamente, sus sistemas de aumentación, y presenta los análisis realizados para evaluar la viabilidad del uso de estas tecnologías en Brasil. Esta nota también muestra las acciones adoptadas para implementar un sistema de respaldo del GNSS.

Acción:	Tal como se indica en la Sección 5
Objetivos estratégicos:	<ul style="list-style-type: none">• Capacidad y eficiencia de la navegación aérea• Seguridad operacional
Referencias:	<ul style="list-style-type: none">• OACI (2002). Segunda Reunión de Coordinación sobre los Ensayos de Aumentación GNSS. Montreal: OACI, 2002. (Documento de proyecto RLA/00/009). Disponible en: https://www.icao.int/SAM/Documents/2002/GNSSA2/GNSS_AII_WP04.pdf. Consultado el: 4 de octubre de 2021.• OACI (2006). Pruebas de aumentación GNSS. Montreal: OACI, 2006. (Informe final del Proyecto RLA/00/009). Disponible en: https://www.icao.int/SAM/eDocuments/RLA00009_ProjectFinalReport.pdf. Consultado el: 4 de octubre de 2021.• Marini-Pereira, L., Pullen, S., Moraes, A. de O., & Sousasantos, J. (2021b). Operación GBAS en bajas latitudes - PARTE 1: Desafíos, mitigaciones y perspectivas futuras. <i>Journal of Airspace Technology and Management</i>, 13(e4621), 1–24. https://doi.org/10.1590/jatm.v13.1236

1. Introducción

1.1 Los requisitos de navegación establecidos en Brasil son RNAV 5 para rutas y RNAV 1 para procedimientos terminales. Esta condición permite a las aeronaves evolucionar a través de todas las fases de vuelo, hasta la altitud mínima de decisión para el procedimiento de aproximación RNAV, ligeramente superior a la mínima para una aproximación de precisión.

1.2 Por lo tanto, a fin de optimizar los servicios prestados por el GNSS, se realizó estudios para aplicar los sistemas de aumentación SBAS y GBAS en el país, con miras a mejorar la integridad, disponibilidad y continuidad del servicio, así como reducir los requisitos mínimos para permitir el uso de la aproximación de precisión CAT I.

1.3 Durante los análisis, se observó un fuerte impacto de los efectos ionosféricos sobre las señales de los satélites en las regiones de baja latitud. Actualmente, el concepto de constelaciones múltiples de doble frecuencia (DFMC) trae consigo la expectativa de una solución para la implementación de sistemas de aumentación en esta porción del globo. Otro factor considerado en la discusión fue la relación costo-beneficio de la utilización de estos servicios y la implementación de un sistema de respaldo, dando mayor seguridad y fluidez al tránsito aéreo, frente a interferencias en la recepción de la señal y la falta de disponibilidad del servicio prestado por el GNSS.

1.4 Por lo tanto, teniendo en cuenta el impacto causado por la ionosfera en las regiones de baja latitud, las interferencias espurias en el GNSS y las soluciones para mejorar el servicio, este es el momento oportuno para el involucramiento de los participantes en el análisis de soluciones tecnológicas para el entorno en las Regiones CAR/SAM.

2 El SBAS en regiones de baja latitud

2.1 Evaluación del sistema

2.1.1 Desde hace más de dos décadas, el Departamento Brasileño de Control del Espacio Aéreo (DECEA) viene evaluando la posibilidad de implementación de sistemas de aumentación GNSS en Brasil. Alrededor de 2002, con el apoyo de la Administración Federal de Aviación (FAA) de Estados Unidos, se instaló y evaluó en el país un banco de pruebas del Sistema de Aumentación Basado en Satélites (SBAS), utilizando la infraestructura que aparece en la Figura 1. Esta evaluación concluyó que no sería posible utilizar el SBAS para aproximaciones de precisión en Brasil, debido a la fuerte influencia de la ionosfera. Los resultados de este banco de pruebas se detallan en OACI (2002; 2006), que concluye que "como resultado de las primeras pruebas de vuelo realizadas en 2002 en Brasil, y posteriormente en Argentina, Bolivia, Chile y Perú, se comprobó que el efecto de la ionosfera sobre la señal GPS no garantizaba las aproximaciones de no precisión (NPA) con requisitos de precisión vertical."



Figura 1 – Estaciones maestra y de referencia utilizadas en el banco de pruebas SBAS en 2002

2.1.2 Además del ensayo arriba mencionado, hubo otros estudios, en el ámbito académico, para evaluar la viabilidad de un SBAS en territorio brasileño, utilizando datos de la Red Brasileña de Monitoreo Continuo de los Sistemas GNSS (*Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo - RBMC*).

2.1.3 El trabajo realizado por Komjathy et al. (2003) comparó la eficiencia de los ajustes planares y cuadráticos para estimar el retardo ionosférico a partir de observaciones de 10 estaciones de referencia en Brasil. Asimismo, Rajagopal et al. (2004) analizaron la estructura de correlación de la ionosfera, utilizando histogramas bidimensionales, y Blanch et al. (2004) evaluaron el resultado de una extensión de un algoritmo kriging para estimar el retardo ionosférico. La performance del SBAS en Brasil también fue evaluada por Lejeune et al. (2003), quienes se centraron en los límites del error ionosférico, basándose principalmente en pequeñas variaciones de los algoritmos del WAAS. Los estudios destacaron el bajo rendimiento del sistema en la región brasileña, en base al análisis detallado de diversos resultados.

2.1.4 Respecto a la performance del SBAS en Brasil, la evaluación de Trilles et al. (2015) mostró mejores resultados de disponibilidad, utilizando 29 estaciones de referencia en Brasil y algoritmos normalizados de EGNOS, con una versión desarrollada para mejorar la performance en lo que los autores llamaron "condiciones ionosféricas severas." A pesar de las mejoras en la técnica desarrollada, se considera que los resultados presentados por Trilles et al. (2015) son optimistas, ya que los datos fueron recogidos y procesados fuera de la temporada de burbujas de plasma. Los trabajos citados se centraron en la definición de parámetros específicos relacionados con el cálculo de los límites de error en la estimación del retardo ionosférico, mientras que Lejeune et al. (2003) mostraron resultados de performance para este parámetro en Brasil. Estos trabajos estuvieron limitados por la escasa cantidad de datos disponibles.

2.1.5 Más recientemente, el trabajo de Marini-Pereira et al. (2021a) mostró el bajo nivel de disponibilidad obtenido con un Sistema de Aumentación Basado en Satélites (SBAS) de una sola frecuencia, utilizando algoritmos del WAAS (Sistema de Aumentación de Área Amplia, utilizado en Estados Unidos) con pequeñas variaciones. El mejor resultado de disponibilidad obtenido entre las combinaciones de metodología y parámetros aparece en la Figura 2, para días con y sin actividad ionosférica significativa. Es importante destacar que el análisis de Trilles et al. (2015) no consideró el período de fuerte actividad en la ionosfera.

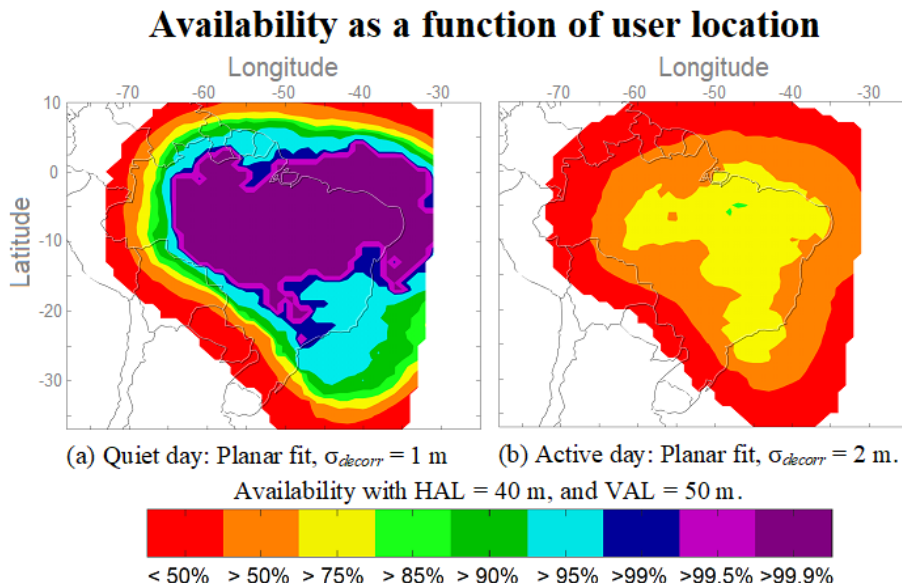


Figura 2 – Gráficos de disponibilidad obtenidos para días con actividad alta y baja, utilizando distintos parámetros con interpolación de ajuste planar, tal como se presentan en Marini-Pereira et al. (2021a).

2.1.6 Por consiguiente, es posible constatar que los retos impuestos por la ionosfera para la implementación del SBAS en las regiones de baja latitud aún no han sido superados por las tecnologías actualmente disponibles.

2.2 Análisis costo-beneficio para Brasil

2.2.1 Además de las limitaciones técnicas, es importante analizar el escenario operacional en el espacio aéreo brasileño, para verificar si se justifica la inversión en la implementación de un sistema de este tipo. En primer lugar, cabe destacar que el 99% de las aerovías superiores y el 79% de las aerovías inferiores son RNAV-5 y que los procedimientos IFR en el TMA brasileño tienen requisitos RNAV-1. Por lo tanto, se observa que el servicio prestado por el GNSS, sin los sistemas de aumentación, cumple los criterios de navegación estipulados para el país.

2.2.2 La Figura 3 muestra el resultado del análisis de todas las pistas brasileñas de todos los aeródromos que cuentan con procedimientos RNAV/RNP (aproximación de no precisión). En el gráfico presentado, se puede observar que aproximadamente el 45% de las pistas tienen OCH inferior a 350 pies y este porcentaje se eleva al 65% para las pistas con OCH inferior a 400 pies.

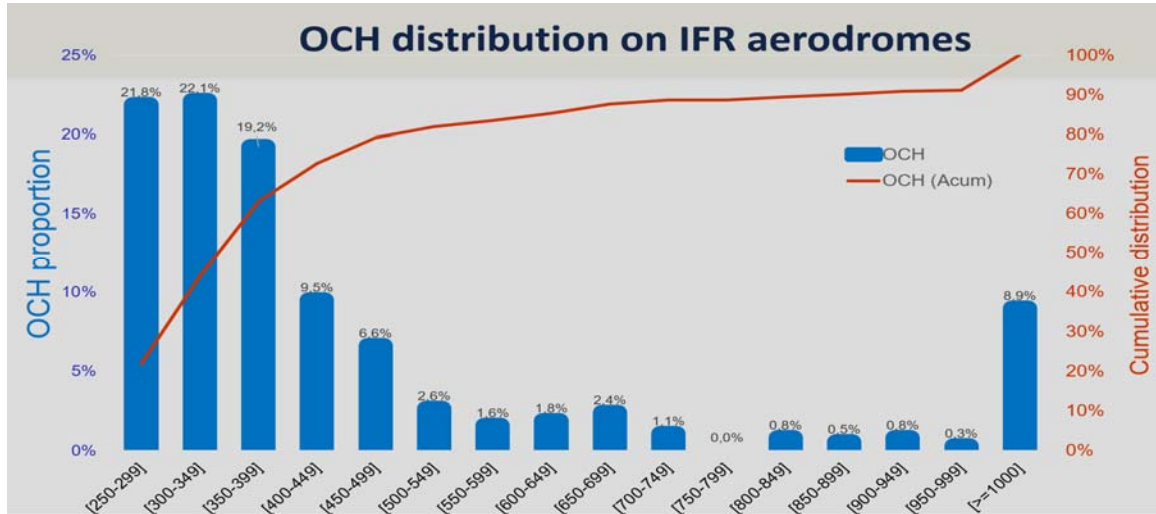


Figura 3 – Distribución OCH de los procedimientos IFR en Brasil

2.2.3 Cabe destacar que, para los aeródromos que operan con aproximación de precisión CAT I, en general, las OCH de los procedimientos RNAV son de 50 a 100 ft superiores a las de los procedimientos ILS. Por lo tanto, considerando la infraestructura terrestre necesaria para la operación de un SBAS, que exige recursos para su instalación y mantenimiento (Figura 4), y considerando los resultados negativos de los ensayos y estudios realizados, el DECEA entiende que esta solución no presenta una relación costo-beneficio ventajosa para el país, en el modelo en que opera actualmente.

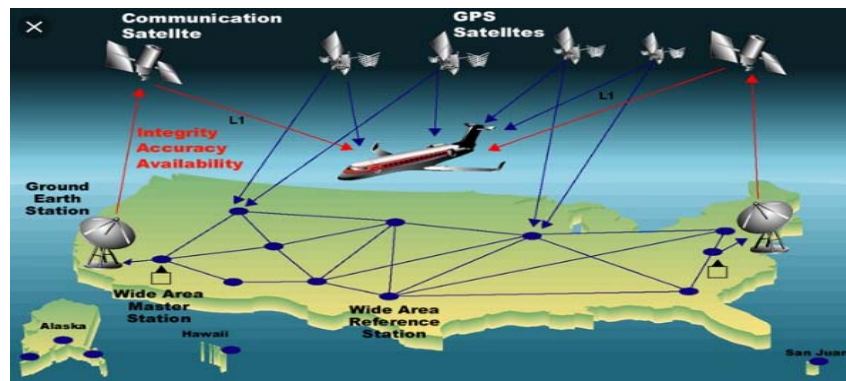


Figura 4 – Configuración de una operación con servicio SBAS

2.2.4 Recientemente, el DECEA inició una investigación sobre la posibilidad de reducir la altitud mínima de decisión (MDA) de los procedimientos RNAV/RNP, basándose en la disponibilidad de la frecuencia GPS L5. El objetivo es evaluar si el uso de las dos frecuencias GPS permitirá reducir los mínimos de los procedimientos arriba mencionados, sin hacer uso de la infraestructura terrestre SBAS. Se espera concluir este proyecto en 2027, aprovechando el aumento del ciclo solar previsto para 2024 y 2025.

3 El GBAS en regiones de baja latitud

3.1 Evaluación del sistema

3.1.1 A la luz de las conclusiones en cuanto a la idoneidad de un SBAS en la región brasileña, en particular las indicadas en los informes de la OACI (2002; 2006), el DECEA reorientó su enfoque hacia la posible adopción del GBAS (sistema de aumentación basado en tierra). Una visión concisa de los

principios fundamentales y un breve relato histórico de los esfuerzos de Brasil para implementar la tecnología GBAS se pueden encontrar en el trabajo de Marini-Pereira et al. (2021b), los cuales aparecen resumidos en este documento.

3.1.2 En 2011, luego que la FAA certificara la estación GBAS SLS-4000 de Honeywell para su uso en la parte continental de Estados Unidos (CONUS), el DECEA adquirió e instaló una estación en el Aeropuerto Internacional de Río de Janeiro (Galeão), para realizar pruebas y evaluar la viabilidad de su uso en Brasil. La instalación del GBAS se completó cuando el ciclo de actividad solar (11 años) estaba alcanzando su nivel máximo, junto con la temporada de centelleo.

3.1.3 Al no estar diseñada para este tipo de entorno, la estación experimentó alertas y paradas inesperadas debido a la aparición de burbujas de plasma en la ionosfera. Por ejemplo, uno de los monitores GBAS fue programado para excluir los satélites con mediciones inconsistentes durante 48 h, basándose en la suposición de una falla del satélite. En el entorno de baja latitud, este monitor interpretó el efecto del centelleo como parámetros fuera de tolerancia y, por lo tanto, todos los satélites afectados por el centelleo fueron excluidos durante 48 horas. Como las señales de varios satélites se vieron afectadas por efectos ionosféricos, el monitor GBAS excluyó un número importante de fuentes transmisoras, reduciendo significativamente el número de satélites considerados, lo que provocó la parada del sistema.

3.1.4 En 2012, Honeywell inició el desarrollo de una nueva versión del soporte lógico del SLS-4000 para mejorar su rendimiento en bajas latitudes. Una de las nuevas características era la posibilidad de configurar un modelo de amenaza ionosférica personalizado (en lugar del modelo fijo de amenaza CONUS incluido originalmente). Un equipo multidisciplinario de varias organizaciones de Brasil, Estados Unidos y Corea del Sur desarrolló un modelo de amenaza ionosférica a baja latitud (enfocado en Brasil). Los resultados aparecen descritos en *Mirus Technology* (2015) y son discutidos en Lee et al. (2015) y Yoon et al. (2017). Los resultados muestran gradientes ionosféricos anómalos mucho mayores que las del modelo de amenaza CONUS, afectando la disponibilidad e integridad de un GBAS en Brasil (Figura 5).

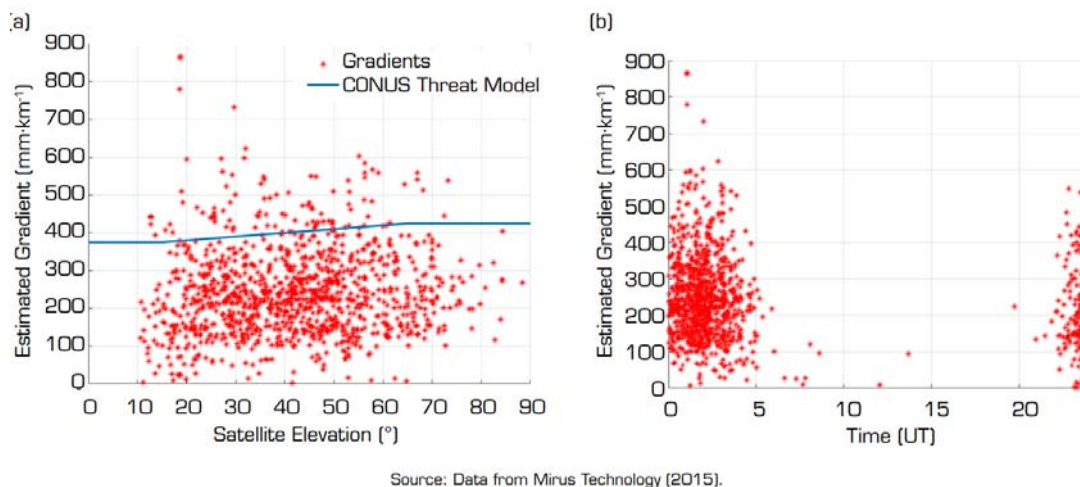


Figura 5 – Gradientes ionosféricas observadas en Brasil. (a) Distribución basada en el ángulo de elevación del satélite, modelo de amenaza CONUS como referencia; (b) Distribución basada en la hora UTC.

3.1.5 Este equipo multidisciplinario también examinó las condiciones operacionales de la estación e identificó que el funcionamiento del GBAS sólo sería seguro a determinadas horas del día (Figura 5), cuando el modelo de amenaza ionosférica CONUS puede ser utilizado (Chang et al. 2019; 2021). Debido a esta restricción, las autoridades brasileñas decidieron no certificar el sistema para operaciones en Brasil.

3.1.6 Con la llegada del concepto de Constelaciones Múltiples de Doble Frecuencia (DFMC), se ha generado nuevas expectativas de aplicación del GBAS en Brasil, que están siendo monitoreadas por el equipo de DECEA.

3.2 Perspectivas para el GBAS DFMC

3.2.1 Estados Unidos y Europa han estado invirtiendo recursos en el análisis del GAST-C (servicio GBAS Tipo C) y GAST-D del GBAS. Estos modelos brindan el servicio de aumentar el posicionamiento a partir de una única constelación de frecuencias, viable para su uso en regiones de latitud media. Otras naciones, como Japón, se han centrado en el análisis y desarrollo de un sistema que utiliza el concepto DFMC para resolver problemas ionosféricos (GAST-F y GAST-X) en bajas latitudes.

3.2.2 Se espera que la disponibilidad de las señales GPS L5 y Galileo E5 permita mitigar los efectos ionosféricos en tiempo real y, por tanto, garantizar la integridad necesaria para la navegación aérea. Sin embargo, el centelleo en las regiones de baja latitud afecta de forma más notoria a la señal L5, lo que suscita preocupación por el uso de esta frecuencia. Se puede observar, basándose en el trabajo de Salles et al. (2021a), que los eventos de centelleo tienen mayor impacto en la frecuencia L5 que en la L1. También se observó que el desvanecimiento de la señal L5 alcanza valores cercanos al doble de los valores de la señal L1. Estos resultados confirman el análisis estadístico presentado por Moraes et al. (2018), en el que se encontró evidencia de eventos de desvanecimiento más severos en la frecuencia L5.

3.2.3 Una de las soluciones contempladas para este problema consiste en utilizar la doble frecuencia únicamente para monitorear la ionosfera, realizando el posicionamiento únicamente con la frecuencia L1. El trabajo elaborado por Felux et al. (2017a) sugiere utilizar un modelo "sin ionosfera" para monitorear la gradiente ionosférica, mientras que el cálculo de la posición se realiza mediante el enfoque de frecuencia única, si es posible, utilizando dos constelaciones.

3.2.4 DECEA está reestructurando la red de monitoreo ionosférico para recibir nuevas constelaciones y frecuencias, con miras a evaluar el impacto de los efectos ionosféricos en el concepto DFMC, para la aplicación de sistemas de aumentación, especialmente GBAS, para el futuro uso de esta tecnología en el país. Se prevé que, en 2028, Brasil dispondrá de datos sólidos para proponer una solución que permita la aplicación de procedimientos de precisión basados en señales de satélite, a partir de la década de 2030.

4 Implementación de la navegación DME/DME como respaldo del GNSS

4.1 Como se mencionó anteriormente, ya existe un número considerable de rutas RNAV 5 y RNAV 1 operando en el espacio aéreo brasileño. La navegación basada en la performance (PBN), apoyada exclusivamente en datos GNSS, presenta el inconveniente de la falta de control del entorno satelital por parte del proveedor de servicios de navegación aérea, además de las posibles interferencias a que está sujeto el sistema. Para mitigar estos riesgos potenciales, la OACI, a través del Plan Mundial de Navegación Aérea (GANP), trazó el objetivo de adoptar medidas que garanticen la resiliencia necesaria para los servicios de navegación aérea.

4.2 Para cumplir con las directrices de la OACI, los Estados comenzaron a instalar DME para apoyar la navegación DME/DME y/o DME/DME/INS, como contingencia del GNSS. En Brasil, la implementación de nuevos sistemas DME tuvo como objetivo mejorar la seguridad operacional y la eficiencia de la navegación basada en la performance, cuando son utilizados conjuntamente con otros medios disponibles, en un contexto más amplio GNSS/DME/INS.

4.3 Durante la fase de diseño del nuevo sistema, se definió que la navegación DME/DME debería atender a las principales aerovías superiores, por encima del FL 250 inclusive, y a las principales áreas terminales (TMA) del país. Las implementaciones empezaron en 2016 y concluirán en 2025, con un total de 52 equipos independientes. También se utilizó los DME asociados al DVOR para analizar la cobertura DME/DME. No se consideran los DME asociados al ILS, debido al ajuste para indicar la distancia desde el umbral de la pista y no la posición real del equipo.

4.4 Debido a la extensión del territorio brasileño, se optó por la navegación DME/DME/INS para las fases de vuelo en ruta, llegada (STAR) y salida (SID). También se dio prioridad a las aerovías que conectan los aeropuertos más transitados del país, como se muestra en la Figura 6.

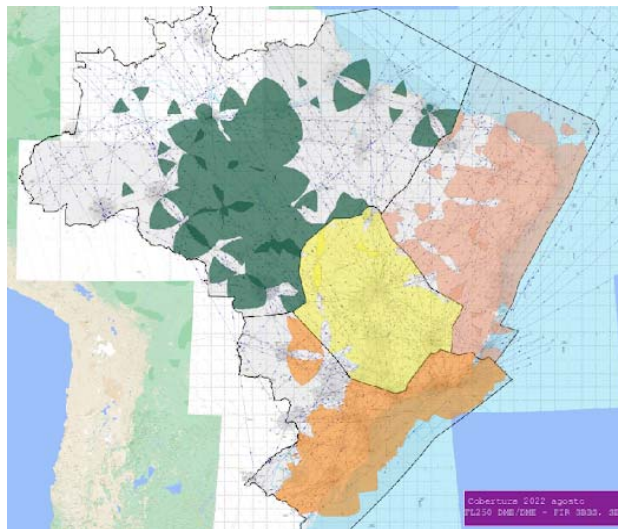


Figura 6 – Mapa de cobertura DME/DME de las aerovías superiores (FL 250)

4.5 Al analizar el número de vuelos regulares que operan en el espacio aéreo brasileño, se identificó que aproximadamente el 85% del tránsito tiene capacidad para realizar navegación DME/DME o DME/DME/INS (Figura 7). Este hecho indica que, en caso de falla o interferencia en el GNSS, el sistema DME reducirá significativamente el impacto de la falta de GNSS, manteniendo la fluidez del tránsito aéreo.

PERÍODO: 01/12/2020 - 13/01/2021									
EMPRESA	TOTAL	B1C1D1	B3D3	B5D1	B3D1	B5D4	PERCENTUAL ROTA DME/DME/INS	PERCENTUAL PROC. DME/DME/INS	PERCENTUAL DME/DME
GOL	22.973	21.485		1.475			99,94%	99,94%	0,00%
TAM	17.494	17.463					99,82%	99,82%	0,00%
AZUL	28.406	17.778	6.310	2.508			71,41%	71,41%	22,21%
PASSAREDO	1.755						0,00%	0,00%	0,00%
TAP	228	228					100,00%	100,00%	0,00%
AAL	229	229					100,00%	100,00%	0,00%
EMIRATES	105	105					100,00%	100,00%	0,00%
UAL	232	231					99,57%	99,57%	0,00%
SIDERAL	1211		1	10		1.157	96,37%	96,37%	0,08%
TOTAL	331						0,00%	0,00%	0,00%
ABSA	268	1			267		0,37%	100,00%	99,63%
FEDERAL EXPRESS	36	36					100,00%	100,00%	0,00%
LUFTHANSA CARGO	73	73					100,00%	100,00%	0,00%
QATAR	94	94					100,00%	100,00%	0,00%
CARGOLUX	62	62					100,00%	100,00%	0,00%
TOTAL	73.497	57.785	6.311	3.993	267	1.157	85,63%	85,99%	8,95%
NACIONAIS	70.628	56.726	6.310	3.983	0	0	85,96%	85,96%	8,93%
INTERNACIONAIS	887	888	0	0	0	0	100,00%	100,00%	0,00%
CARGAS	1.981	172	1	10	267	1.157	67,59%	81,07%	13,48%
TODOS FLP/RPL	169.311	60.624	8.618	4.379	267	1.372			
		B2D2	41.814						

Figura 7 – Distribución de los criterios de navegación para el tránsito que opera en Brasil

4.6 Por último, para evaluar las características del servicio, que se pondrá a disposición de los usuarios del Sistema Brasileño de Control del Espacio Aéreo en 2024, se utilizó la siguiente documentación para definir los criterios de navegación, inspección en vuelo y pruebas en tierra:

- Anexo 10, Volumen 1;
- Doc 9613;
- Doc 8168;
- Doc 8071;
- EUROCONTROL-GUID-0114; y
- AC 90-100A.

5 Acción sugerida

5.1 Se invita a la Reunión a:

- tomar nota de la información contenida en esta nota de estudio y formular sus comentarios y opiniones;
- contribuir con análisis adicionales; y
- formular otras acciones que el grupo considere necesarias para el entorno CAR/SAM.