



Máster Universitario en Ingeniería Aeronáutica

TRABAJO DE FIN DE MÁSTER

**Evaluación del Desempeño de EGNOS en condiciones de alta
actividad solar - Impacto en Integridad, Continuidad,
Disponibilidad y Precisión**

María Cerrada Muñoz

Curso 2024-2025

Título: Evaluación del Desempeño de EGNOS en condiciones de alta actividad solar - Impacto en Integridad, Continuidad, Disponibilidad y Precisión

Autor: María Cerrada Muñoz

Tutor: Daniel González Juárez

Titulación: Máster Habilitante en Ingeniería Aeronáutica

Curso: 2024-2025

Resumen

El presente Trabajo de Fin de Máster evalúa el impacto de la actividad solar en el servicio del sistema europeo de aumentación por satélite EGNOS, centrándose en sus cuatro prestaciones clave: precisión, integridad, continuidad y disponibilidad. Este estudio pretende anticiparse a un problema futuro: el aumento significativo de la actividad solar. Mediante este análisis, se pretende evaluar cómo estas condiciones afectan al rendimiento del sistema, especialmente en operaciones críticas como las aproximaciones LPV-200 en aviación.

Para ello, se seleccionaron los días con mayor y menor actividad solar entre agosto y diciembre de 2024, utilizando indicadores como el índice Kp, Dst, TEC, número de manchas solares y flujo F10.7. Asimismo, se analizaron datos procedentes de siete estaciones EGNOS distribuidas en distintas latitudes europeas. El procesamiento se realizó mediante el software PEGASUS, utilizando mensajes SBAS y archivos RINEX reales.

Los resultados muestran que, aunque EGNOS mantiene la integridad en todos los escenarios, se detectan variaciones significativas en la disponibilidad, precisión y continuidad, especialmente en estaciones situadas en latitudes extremas como Reikiavik y Canarias. Estas regiones presentan una mayor sensibilidad a la actividad solar, con picos de error y reducción temporal de la cobertura LPV-200. Por el contrario, las estaciones situadas en el centro de Europa como ALBA (Aalborg, Dinamarca) o SOFA (Sofía, Bulgaria) muestran un rendimiento altamente estable, incluso en días con condiciones ionosféricas adversas.

En conclusión, el estudio confirma la robustez de EGNOS frente a la actividad solar en la mayoría de Europa, aunque pone de manifiesto la necesidad de seguir monitorizando su comportamiento en zonas con mayor vulnerabilidad geomagnética, para garantizar la continuidad del servicio en contextos críticos.

Palabras clave: SBAS, EGNOS, Actividad solar, Ionosfera, LPV200

Agradecimientos

Este Trabajo de Fin de Máster pone el punto final a mi recorrido académico en el Máster Universitario en Ingeniería Aeronáutica, completando así mis estudios como ingeniera superior aeroespacial. Esta etapa no solo me ha permitido crecer profesionalmente, sino también desarrollarme a nivel personal.

En primer lugar, quiero agradecer profundamente a mi familia por el apoyo incondicional que me han brindado durante todos estos años de formación. Su cariño, comprensión y ánimo constante han hecho que este camino fuese mucho más llevadero.

A Marcos, mi compañero de vida y de estudios, gracias por compartir conmigo esta aventura, por estar presente desde que nos conocimos al final del grado y durante todo el máster, y por hacer que incluso las largas sesiones de estudio fueran más llevaderas y llenas de sentido.

También deseo expresar mi agradecimiento a todo el profesorado del máster, y en especial a mi director, Daniel, por su dedicación, cercanía y pasión por la enseñanza. Gracias por demostrar que, además de excelencia académica, en esta profesión también hay espacio para la vocación y el compromiso humano.

ÍNDICE

RESUMEN	2
AGRADECIMIENTOS	4
1 INTRODUCCIÓN	9
1.1 OBJETIVO DEL ESTUDIO	9
1.2 IMPORTANCIA DEL ANÁLISIS DE LA ACTIVIDAD SOLAR EN GNSS.....	10
2 ESTADO DEL ARTE.....	12
2.1 SISTEMAS GNSS Y EGNOS	12
2.1.1 CONCEPTO DE NAVEGACIÓN	12
2.1.2 INTRODUCCIÓN A EGNOS	13
2.2 ACTIVIDAD SOLAR Y SEÑALES GNSS.....	16
2.2.1 FENÓMENOS ASOCIADOS CON LA ACTIVIDAD SOLAR.....	17
2.2.2 IMPACTO EN EL ENTORNO TERRESTRE.....	17
2.2.3 IMPACTO DE LA ALTA ACTIVIDAD SOLAR EN GNSS Y SBAS	18
2.3 PARÁMETROS UTILIZADOS PARA MEDIR LA ACTIVIDAD SOLAR Y GEOMAGNÉTICA.....	20
2.3.1 ÍNDICE KP	20
2.3.2 ÍNDICE DST (DISTURBANCE STORM TIME).....	21
2.3.3 TEC (TOTAL ELECTRON CONTENT)	22
2.3.4 MANCHAS SOLARES (SN)	23
2.3.5 FLUJO SOLAR F10.7.....	24
2.3.6 EYECCIONES DE MASA CORONAL (CME).....	25
2.4 PRESTACIONES DE LOS SISTEMAS SBAS (EGNOS).....	25
2.4.1 PRECISIÓN	25
2.4.2 INTEGRIDAD.....	28
2.4.3 CONTINUIDAD	32
2.4.4 DISPONIBILIDAD	33
2.5 DATOS Y FORMATOS UTILIZADOS PARA EL ANÁLISIS DE EGNOS	34
2.5.1 MENSAJES SBAS Y CORRECCIONES IONOSFÉRICAS.....	34
2.5.2 RINEX DE NAVEGACIÓN Y OBSERVACIÓN.....	36
2.5.3 FORMATO DE LOS DISTINTOS FICHEROS GNSS.....	37
2.6 NORMATIVA OACI Y USO DE SBAS EN LA AVIACIÓN.....	38
2.6.1 PRINCIPIOS FUNDAMENTALES: PBN, RNAV Y RNP.....	39
2.6.2 INTRODUCCIÓN DE GNSS Y SBAS EN LA AVIACIÓN	39

2.6.3 EVOLUCIÓN DE LAS APROXIMACIONES: DE APV A LPV.....	39
2.6.4 REQUISITOS DE LA NORMATIVA OACI PARA APROXIMACIONES GNSS.....	40
3 METODOLOGÍA DE ANÁLISIS	41
3.1 SELECCIÓN DE DÍAS DE ESTUDIO.....	41
3.1.1 FUENTES DE DATOS Y VALORES DE REFERENCIA PARA EL ANÁLISIS DE LOS PARÁMETROS RELACIONADOS CON LA ACTIVIDAD SOLAR.....	41
3.1.2 EJEMPLO PRÁCTICO: OCTUBRE 2024.....	43
3.2 SELECCIÓN DE ESTACIONES EGNOS EN EUROPA	45
3.3 INPUTS DEL ESTUDIO.....	48
3.3.1 MENSAJES SBAS DE EGNOS	49
3.3.2 ARCHIVOS RINEX DE NAVEGACIÓN Y OBSERVACIÓN.....	49
3.3.2.1. Procesamiento previo de los archivos RINEX	49
3.3.3 REPORTE DE RENDIMIENTO DE EGNOS	51
3.4 SIMULACIÓN CON EL SOFTWARE PEGASUS	52
3.4.1 CONVERTOR	53
3.4.2 GNSS SOLUTION.....	54
3.4.3 M-FILE RUNNER	57
4 ANÁLISIS DE RESULTADOS	59
4.1 PRECISIÓN	59
4.2 INTEGRIDAD	62
4.2.1 EJEMPLO DE GRÁFICAS DE INTEGRIDAD	63
4.2.2 RESULTADOS TABULADOS.....	66
4.3 DISPONIBILIDAD.....	72
4.4 CONTINUIDAD	75
5 CONCLUSIONES DEL ESTUDIO	78
5.1 POSIBLES IMPLICACIONES PARA LA NAVEGACIÓN AÉREA Y CUMPLIMIENTO DE ESTÁNDARES OACI	79
5.2 LIMITACIONES DEL ESTUDIO	80
6 BIBLIOGRAFÍA.....	82

LISTA DE TABLAS Y FIGURAS

Figura 2-1. Esquema de trilateración en 2D	12
Figura 2-2. Esquema de trilateración en 3D	13
Figura 2-3. Arquitectura de EGNOS.....	15
Figura 2-4. Actividad solar y su efecto sobre la Tierra	16
Figura 2-5. Ionospheric Grid Points.....	19
Figura 2-6. Relación entre la actividad solar y el índice Kp.....	21
Figura 2-7. Relación entre la actividad solar y el índice Dst.....	22
Figura 2-8. EGNOS LPV-200 HNSE Histograma y probabilidad acumulada enero de 2025	27
Figura 2-9. EGNOS LPV-200 VNSE Histograma y probabilidad acumulada enero de 2025.....	28
Figura 2-10. Diagrama de Stanford	29
Figura 2-11. EGNOS APV-I Horizontal Safety Index [HIS] enero de 2025	31
Figura 2-12. EGNOS APV-I Vertical Safety Index [VIS] enero de 2025	31
Figura 2-13. EGNOS APV-I Continuidad en enero de 2025	33
Figura 2-14. EGNOS APV-I Disponibilidad en enero de 2025	34
Figura 2-15. Formato del principio de RINEX 4.0 de Observación.....	38
Figura 3-1. Ubicación de las estaciones EGNOS seleccionadas	47
Figura 3-2. Interfaz del módulo Convertor	53
Figura 3-2. Interfaz del módulo GNSS Solution	55
Figura 3-4. Interfaz del módulo M-File Runner	57
Figura 4-1. Ejemplo de grafica HSI	63
Figura 4-2. Ejemplo de grafica VSI	63
Figura 4-3. Ejemplo de diagrama horizontal de Stanford.....	64
Figura 4-4. Ejemplo de diagrama vertical de Stanford	64
Figura 4-5. Comparación de diagrama de Stanford horizontal de PEGASUS (izquierda) y EGNOS (derecha) para la estación CNRA el día 17/09/2024	64
Figura 4-6. Comparación de diagrama de Stanford vertical de PEGASUS (izquierda) y EGNOS (derecha) para la estación TROA el día 12/09/2024	65
Figura 4-7. Comparación de diagrama de Stanford horizontal de PEGASUS (izquierda) y EGNOS (derecha) para la estación ROMA el día 12/08/2024.....	65

Tabla 3-1. Días seleccionados para el análisis	41
Tabla 3-2. Ejemplo de análisis de la actividad solar	43
Tabla 3-3. Coordenadas de las estaciones EGNOS seleccionadas	46
Tabla 4-1. Resultados de precisión horizontal.....	60
Tabla 4-2. Resultados de precisión vertical	61
Tabla 4-3. % de épocas disponibles para los diagramas de Stanford horizontales de cada estación .	67
Tabla 4-3. % de operación en LPV200 para los diagramas de Stanford verticales de cada estación .	68
Tabla 4-3. Resultados de integridad horizontal	70
Tabla 4-4. Resultados de integridad vertical.....	71
Tabla 4-5. Resultados de disponibilidad	73
Tabla 4-6. Resultados de continuidad.....	76

1 Introducción

Los sistemas globales de navegación por satélite han revolucionado la vida tal y como la conocemos. El primer sistema de posicionamiento global (GPS), desarrollado en la década de 1970 por el Departamento de Defensa de los Estados Unidos marca el inicio de una nueva era en lo que a navegación se refiere. Aunque concebido inicialmente para fines militares, su posterior apertura al uso civil ha impulsado avances tecnológicos y mejoras en la calidad de vida.

Con el tiempo, los sistemas de navegación han evolucionado para ofrecer mejores prestaciones. Un claro ejemplo es EGNOS (European Geostationary Navigation Overlay Service), un sistema de aumentación basado en satélites (SBAS). EGNOS actualmente procesa señales de GPS y, en el futuro, se prevé su compatibilidad con Galileo, mediante correcciones diferenciales y datos de integridad [1]. Actualmente EGNOS es capaz de ofrecer la posición con una precisión de 3 metros en horizontal y 4 metros en vertical mientras que la precisión para GPS estándar es de menos de 100 metros en horizontal y 156 metros en vertical.[2], [3].

A pesar de las mejoras que los sistemas SBAS aportan a la precisión y fiabilidad de los sistemas GNSS, siguen siendo vulnerables a diversos factores, siendo la actividad solar uno de los más críticos. Durante periodos de alta actividad solar, el aumento de la radiación y el viento solar intensifica la ionización de la ionosfera, provocando fluctuaciones en la densidad del plasma. Esto genera errores en la propagación de la señal, pérdidas de seguimiento de satélites y aumentos del tiempo de convergencia de las correcciones ionosféricas, afectando directamente la precisión y disponibilidad del servicio SBAS. En casos extremos puede llegar a verse comprometida la integridad del sistema y limitando su uso en aplicaciones críticas como la aviación. Por ello, entender y mitigar estos efectos es fundamental para garantizar la fiabilidad de los SBAS en escenarios de alta variabilidad ionosférica.

En este trabajo de fin de Máster, se pretende precisamente entender los efectos de la alta actividad solar. Para ello, se seleccionarán estratégicamente los dos días con mayor y los dos días con menor actividad solar durante los últimos cinco meses de 2024, permitiendo una comparación detallada de sus efectos. Además, se elegirán estaciones GNSS distribuidas por toda Europa para evaluar cómo las variaciones ionosféricas influyen en las correcciones proporcionadas por EGNOS, mejorando así la comprensión de su comportamiento en distintos entornos geográficos y condiciones solares.

1.1 Objetivo del estudio

El presente trabajo de fin de Máster tiene como objetivo analizar cómo afecta la alta actividad solar en las prestaciones ofrecidas por un sistema SBAS, en concreto, EGNOS. Para ello, se han escogido los dos días con mayor y los dos días con menor actividad solar de los últimos 5 meses de 2024 para tener una muestra lo suficientemente amplia y representativa.

En cuanto a las estaciones, se han elegido siete estaciones en diferentes latitudes y longitudes a lo largo de toda la zona en la que EGNOS ofrece servicio. Estas estaciones se encuentran en entornos aeroportuarios por lo que, además, se analizarán los estándares que han de ser cumplidos por este tipo de estaciones según la OACI.

Objetivos específicos:

1. Evaluar la influencia de la actividad solar alta y baja en la precisión del sistema EGNOS: Medir la variabilidad en las prestaciones del sistema durante los días seleccionados y analizar las causas de cualquier anomalía observada.
2. Comparar las prestaciones del sistema en diferentes ubicaciones geográficas: Analizar cómo la latitud y longitud de las estaciones influyen en el rendimiento del sistema bajo diferentes condiciones de actividad solar.
3. Estudiar el cumplimiento de los estándares de la OACI en estaciones aeroportuarias: Verificar si las estaciones seleccionadas cumplen con los requisitos establecidos por la OACI y cómo estos estándares pueden verse afectados por la actividad solar.

Resultados esperados:

- Determinar la relación entre la actividad solar y la precisión del sistema EGNOS.
- Identificar cualquier variabilidad geográfica en el rendimiento del sistema.
- Evaluar el cumplimiento de los estándares de la OACI por parte de las estaciones seleccionadas.
- Proporcionar recomendaciones prácticas para mejorar el rendimiento del sistema EGNOS en condiciones de alta actividad solar.

Este análisis permitirá entender mejor los desafíos que plantea la alta actividad solar y buscar soluciones que aseguren la fiabilidad y precisión del sistema EGNOS, especialmente en contextos críticos como los entornos aeroportuarios.

1.2 Importancia del análisis de la actividad solar en GNSS

Existen múltiples factores que afectan a la señal GNSS, repercutiendo en la calidad del servicio ofrecido. Uno de los más preocupantes es la actividad solar, debido a sus efectos sobre la ionosfera y magnetosfera terrestres.

Aproximadamente cada once años, el campo magnético solar experimenta variaciones cíclicas que afectan la actividad de la superficie solar. El ciclo solar número veinticinco comenzó en diciembre de 2019, y se espera que alcance su máximo entre 2023 y 2026, con una intensidad similar o ligeramente mayor a la del ciclo anterior.

Estos fenómenos solares pueden provocar efectos impresionantes en la Tierra, como coloridas auroras boreales, pero también pueden afectar negativamente las comunicaciones de radio y las señales GNSS.

La alta actividad solar aumenta la ionización en la ionosfera, lo que puede causar afectar negativamente a las señales de navegación por satélite.

La previsión de un aumento en la actividad solar en los próximos años, junto con la creciente dependencia de nuestra sociedad en tecnologías GNSS, subraya la importancia de continuar investigando en este campo. Es esencial comprender cómo afecta la actividad solar a las señales GNSS para mejorar los modelos de predicción y garantizar que los profesionales y autoridades puedan planificar mejor las medidas de mitigación necesarias.[4]

Además, este análisis permite anticipar y minimizar posibles interrupciones en los servicios GNSS, asegurando así la precisión y fiabilidad de estos sistemas en aplicaciones críticas como la aviación, la navegación marítima y las comunicaciones terrestres.

2 Estado del arte

2.1 Sistemas GNSS y EGNOS

2.1.1 Concepto de navegación

La navegación es el proceso de determinar la posición y dirección. Los satélites emplean señales de radiofrecuencia para llevar a cabo la navegación. La distancia entre el emisor y el receptor se determina midiendo el tiempo que tarda la señal en viajar desde el satélite hasta el receptor. Para garantizar la precisión de esta medición, los satélites están equipados con relojes atómicos altamente precisos. Dado que la señal viaja a la velocidad de la luz, al multiplicar el tiempo transcurrido por esta velocidad se obtiene la distancia al satélite.

En el problema bidimensional, se necesitan exactamente tres mediciones para determinar la posición de un punto. Este principio se denomina trilateración. Con la primera medición, solo se sabe que el receptor se encuentra a una distancia x del emisor, lo que define una circunferencia con radio x . Con la segunda medición, el problema se reduce a la intersección de ambas circunferencias, lo que genera dos soluciones posibles. Por esta razón, se requiere una tercera medición para determinar de manera única la posición del receptor.

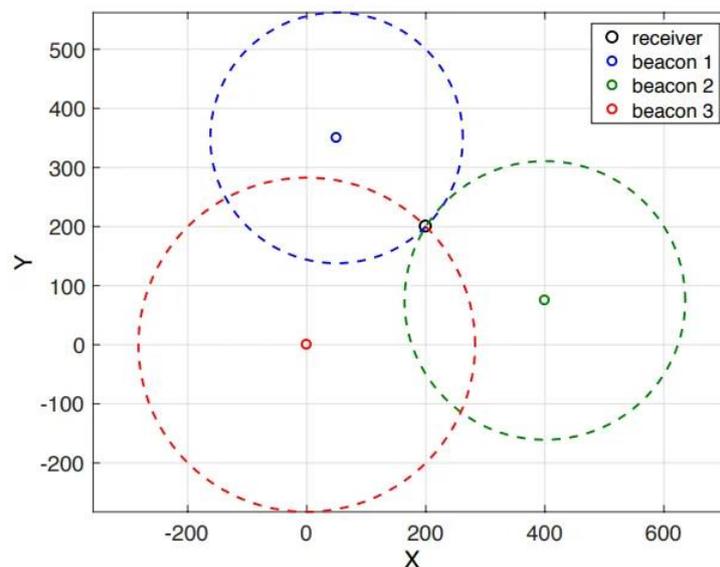


Figura 2-1. Esquema de trilateración en 2D

Cuando el problema se extiende a tres dimensiones, en lugar de circunferencias se utilizan esferas. En GNSS, la distancia entre cada satélite y el receptor se calcula de manera similar, utilizando el tiempo de propagación de la señal. Sin embargo, los receptores GNSS no están equipados con relojes atómicos,

sino con relojes menos precisos que generan un desfase temporal desconocido. Este desfase introduce errores en la medición del tiempo y, en consecuencia, en la estimación de la distancia a los satélites.

Para corregir este error, es necesario recibir señales de al menos cuatro satélites. Aunque en un espacio tridimensional tres satélites bastarían para determinar un único punto de intersección entre las esferas de posición, el error de reloj del receptor añade una incógnita adicional. La introducción de una cuarta medición permite resolver simultáneamente las coordenadas espaciales del receptor y el desfase del reloj. De esta manera, el receptor ajusta su reloj interno con cada nueva observación, mejorando la precisión de su posicionamiento.[5]

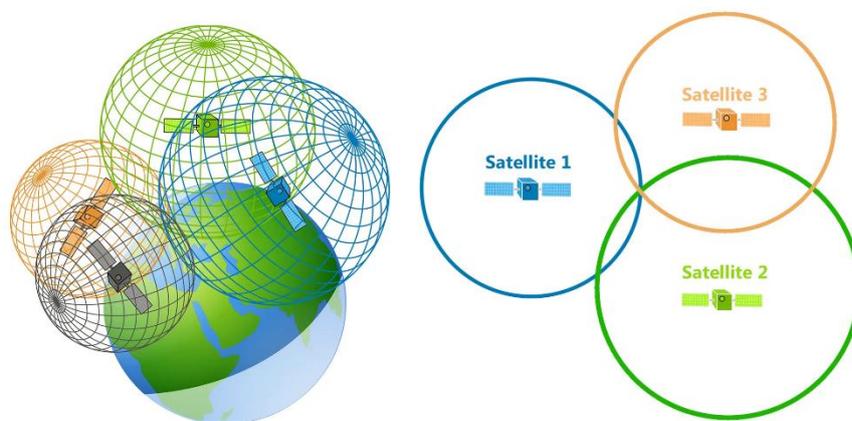


Figura 2-2. Esquema de trilateración en 3D

2.1.2 Introducción a EGNOS

El Sistema Europeo de Navegación de aumentación por satélite EGNOS, por sus siglas en inglés: European Geostationary Navigation Overlay Service fue desarrollado por la Unión Europea para mejorar las prestaciones de las señales de los sistemas globales de navegación por satélite (GNSS, Global Navigation Satellite Systems), como el Sistema de Posicionamiento Global (GPS) de Estados Unidos y, en el futuro, el sistema Galileo de Europa [6].

EGNOS se diseñó con el objetivo principal de mejorar la calidad del posicionamiento satelital en Europa, proporcionando información crítica para aplicaciones que requieren alta precisión y seguridad, como la aviación, la navegación marítima y terrestre, la agronomía de precisión y otros sectores industriales. Su función es corregir los errores en las señales GNSS causados por diversos factores, como la ionosfera, los relojes de los satélites y otros efectos atmosféricos, mejorando así la exactitud de la posición calculada por los receptores en la superficie terrestre.

Servicios de EGNOS

María Cerrada Muñoz

Trabajo Fin de Máster – Evaluación del desempeño de EGNOS en condiciones de alta actividad solar

EGNOS proporciona varios servicios que mejoran las prestaciones de GPS en Europa y son interoperables con otros sistemas SBAS existentes [6]:

- **Open Service (OS):** Su principal objetivo es mejorar la precisión del posicionamiento mitigando errores debidos a los relojes de los satélites, la posición de los satélites y los efectos ionosféricos. Además, detecta distorsiones en las señales de GPS para evitar el uso de datos incorrectos. Este servicio es gratuito y accesible sin certificación especial desde el 1 de octubre de 2009.
- **Safety of Life (SoL) Service:** Ofrece un nivel de rendimiento muy alto para aplicaciones críticas de seguridad, como la aviación civil, permitiendo aproximaciones con guiado vertical (LPV). Aunque su desarrollo se centró en aviación, podría aplicarse en otros sectores como el ferroviario, marítimo y vial en el futuro. Está disponible desde el 2 de marzo de 2011.
- **EGNOS Data Access Service (EDAS):** Destinado a usuarios comerciales y profesionales que necesitan acceso mejorado a los datos de EGNOS. Proporciona datos en tiempo real y archivos históricos a través de un servidor terrestre, permitiendo a proveedores de aplicaciones desarrollar servicios de alta precisión. Disponible desde el 26 de julio de 2012.
- **EGNOS SoL Assisted Service for Maritime Users (ESMAS):** Diseñado para la navegación marítima, este servicio permite operaciones seguras conforme a las regulaciones de la Organización Marítima Internacional (IMO), garantizando un guiado preciso en aguas costeras, accesos a puertos y aguas interiores de la Unión Europea y países asociados.

Arquitectura de EGNOS

EGNOS (European Geostationary Navigation Overlay Service) se compone de cuatro segmentos funcionales:

1. **Segmento tierra:** Incluye una red de 38 estaciones de monitoreo de integridad y distancia (RIMS), 2 Centros de Control de Misión (MCC), 2 Estaciones Terrestres de Enlace de Navegación (NLES) por cada satélite GEO, y la Red de Área Amplia de EGNOS (EWAN) que interconecta estos componentes.
 - 38 RIMS: Recogen mediciones de los satélites GPS y transmiten datos en tiempo real a los MCC.
 - 2 MCC: Procesan las mediciones recibidas y generan mensajes de corrección para mejorar la precisión y la integridad del sistema.
 - 2 NLES por GEO: Transmiten los mensajes de EGNOS a los satélites GEO para su retransmisión a los usuarios y sincronización con las señales GPS.
2. **Segmento soporte:** Comprende infraestructuras adicionales para la gestión y evaluación del sistema.
 - PACF (Performance Assessment and Checkout Facility): Analiza el rendimiento, resuelve problemas operacionales y valida mejoras en el sistema.

- ASQF (Application Specific Qualification Facility): Proporciona herramientas para la certificación de aplicaciones EGNOS en sectores como la aviación.
3. **Segmento espacio:** Consta de al menos tres satélites geostacionarios que transmiten correcciones y datos de integridad en la banda L1 (1575.42 MHz). Su configuración garantiza redundancia operativa, asegurando que al menos dos satélites estén activos en todo momento.
 4. **Segmento usuario:** Incluye receptores compatibles con EGNOS, utilizados en sectores como agricultura, aviación, marítimo, ferroviario, cartografía y servicios basados en localización (LBS). Estos dispositivos permiten a los usuarios calcular su posición con mayor precisión e integridad.

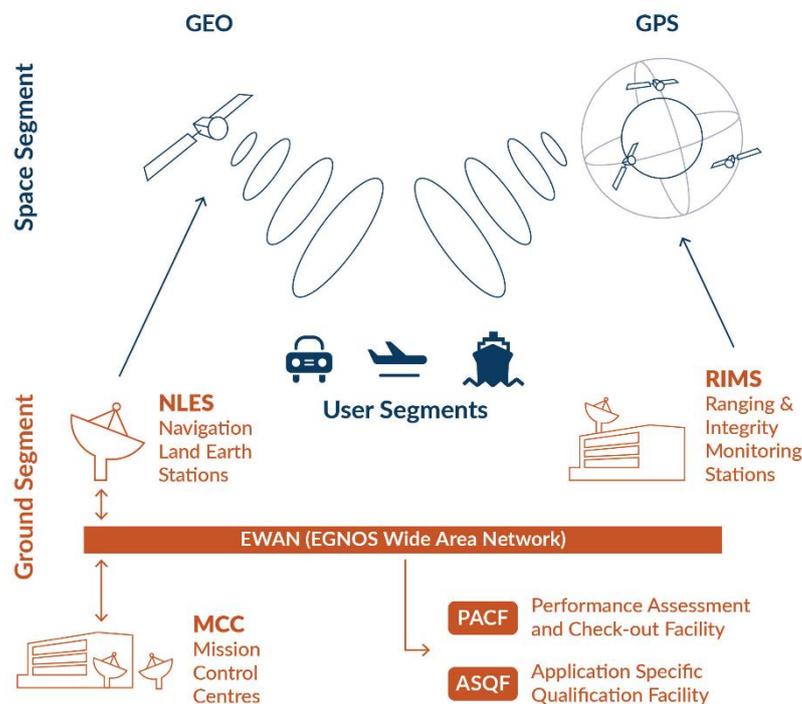


Figura 2-3. Arquitectura de EGNOS

Beneficios y Aplicaciones de EGNOS

EGNOS ofrece una mejora significativa en la calidad del posicionamiento GNSS. Su principal beneficio es la corrección de errores en las señales GPS, permitiendo una mayor precisión y confiabilidad. Gracias a esto, tiene aplicaciones en diversos sectores:

- **Aviación:** EGNOS permite la realización de aproximaciones aeronáuticas de alta precisión sin necesidad de infraestructura terrestre adicional. Esto mejora la seguridad en aterrizajes y optimiza el uso del espacio aéreo.
- **Navegación marítima y fluvial:** Proporciona mayor exactitud en la posición de embarcaciones, permitiendo una navegación más segura y eficiente en puertos y vías fluviales.

- Agricultura de Precisión: Facilita la aplicación eficiente de insumos (fertilizantes, pesticidas, agua) al mejorar la precisión en la localización de cultivos.
- Transporte terrestre y ferroviario: Mejora la gestión del tráfico, la seguridad en la circulación y la eficiencia del transporte de mercancías.
- Servicios de emergencia: Favorece la localización rápida y precisa en situaciones de rescate y atención de emergencias.

2.2 Actividad solar y señales GNSS

Los sistemas globales de navegación por satélite (GNSS) dependen de la propagación de ondas de radio a través de la ionosfera para proporcionar servicios de posicionamiento y navegación de alta precisión. Sin embargo, la actividad solar introduce variaciones en el medio ionosférico que pueden afectar la precisión y disponibilidad de las señales GNSS. Estos efectos pueden ser particularmente severos durante periodos de alta actividad solar, cuando diversos fenómenos solares generan perturbaciones en la magnetosfera y la ionosfera terrestre.

Para comprender la influencia de la actividad solar en los sistemas GNSS, es fundamental analizar los principales fenómenos solares y su impacto en la ionosfera. En esta sección, se examinan estos eventos y se evalúa cómo afectan la propagación de las señales GNSS, con un enfoque especial en los sistemas de aumentación basados en satélites (SBAS).



Figura 2-4. Actividad solar y su efecto sobre la Tierra

2.2.1 Fenómenos asociados con la actividad solar

La actividad solar sigue un ciclo de aproximadamente 11 años, conocido como ciclo solar, durante el cual la cantidad de manchas solares varía, afectando la intensidad de otros fenómenos solares. A medida que el ciclo alcanza su máximo, aumentan la frecuencia y la intensidad de eventos como las erupciones solares, las eyecciones de masa coronal y la variabilidad en la irradiancia ultravioleta extrema.

El ciclo solar influye en la ionización de la atmósfera terrestre, modificando la propagación de señales GNSS. Además del ciclo de 11 años, estudios recientes sugieren la existencia de ciclos solares superpuestos de aproximadamente 17 años, conocidos como el Ciclo Solar Extendido, lo que indica que la actividad solar es más compleja de lo que se pensaba anteriormente [7].

Los fenómenos asociados con la actividad solar incluyen:

- **Manchas solares (Sun Spots):** Regiones de intensa actividad magnética en la superficie del Sol, cuyo número varía a lo largo del ciclo solar y está estrechamente relacionado con la intensidad de otros fenómenos solares.
- **Erupciones solares (Solar Flares):** Explosiones repentinas de energía en la superficie del Sol que emiten grandes cantidades de radiación electromagnética, incluyendo rayos X y ultravioleta extremo (EUV). Estas emisiones pueden aumentar la ionización en la ionosfera y generar rápidas perturbaciones en las señales GNSS.
- **Eyecciones de masa coronal (Coronal Mass Ejections - CMEs):** Expulsiones masivas de plasma y campo magnético desde la corona solar que pueden viajar a través del espacio interplanetario y afectar la magnetosfera terrestre.
- **Agujeros coronales (Coronal Holes):** Regiones de la corona solar con menor densidad y temperatura, que emiten corrientes de viento solar de alta velocidad. Estas corrientes pueden intensificar la actividad geomagnética y afectar la ionosfera.
- **Emisiones de radio F10.7:** La radiación en la banda de 10.7 cm (2.8 GHz) es un indicador de la actividad solar, correlacionado con la producción de radiación ultravioleta extrema y la ionización de la atmósfera superior.
- **Irradiación UV extrema (Solar EUV Irradiance):** La radiación ultravioleta extrema del Sol es la principal fuente de ionización en la ionosfera diurna. Su variabilidad afecta la densidad del contenido total de electrones (TEC) y la propagación de señales GNSS.

2.2.2 Impacto en el entorno terrestre

Los fenómenos solares generan perturbaciones en el entorno geoespacial, que afectan la propagación de señales GNSS. Algunos de los principales efectos incluyen:

- **Magnetosfera y Kp Index:** El índice Kp mide la actividad geomagnética global y está influenciado por la interacción del viento solar con el campo magnético terrestre. Altos valores de Kp indican mayor inestabilidad en la magnetosfera.
- **Tormentas geomagnéticas (Dst Index):** Eventos en los que el campo magnético terrestre experimenta una fuerte reducción debido a la interacción con CMEs o viento solar de alta velocidad. Se mide con el índice Dst, el cual es un indicador de la intensidad de estas tormentas.
- **Auroras:** Descargas de energía en las regiones polares generadas por la interacción entre partículas solares y la atmósfera terrestre. Aunque espectaculares, son indicadores de una magnetosfera perturbada.
- **Ionosfera y TEC:** El Contenido Total de Electrones (TEC) es un parámetro clave para la propagación de señales GNSS. Su variabilidad, influenciada por la actividad solar, puede causar errores en el posicionamiento.
- **Cintilaciones ionosféricas:** Variaciones rápidas en la intensidad y fase de las señales GNSS debido a estructuras de densidad en la ionosfera. Estas irregularidades afectan especialmente las frecuencias de navegación, degradando la precisión y disponibilidad del servicio.
- **Corrientes inducidas en el suelo (GICs):** Variaciones en el campo magnético terrestre pueden inducir corrientes en infraestructuras eléctricas y de telecomunicaciones, generando posibles fallos en sistemas críticos.

2.2.3 Impacto de la alta actividad solar en GNSS y SBAS

La actividad solar influye directamente en la ionosfera terrestre, siendo uno de los principales factores que afectan el rendimiento de los sistemas GNSS y SBAS. Este efecto puede traducirse en un aumento significativo del error en las mediciones de estos sistemas, afectando su precisión, disponibilidad e integridad.

Las señales de radio que atraviesan la ionosfera experimentan diversos efectos ionosféricos, la mayoría de ellos dependientes del contenido total de electrones (TEC, por sus siglas en inglés). Además de las variaciones bien conocidas del TEC, existen otras irregularidades ionosféricas, como tormentas ionosféricas, fluctuaciones espaciales y temporales del TEC, atenuaciones localizadas y cintilaciones. Estas irregularidades pueden manifestarse en áreas muy reducidas, lo que dificulta su detección desde las estaciones de referencia de los sistemas SBAS. Como consecuencia, pueden producirse eventos como la pérdida de integridad a nivel de usuario o la degradación de la disponibilidad del sistema si este intenta aplicar correcciones en eventos ionosféricos altamente localizados.

Modelado de la Ionosfera en SBAS y su Impacto ante Alta Actividad Solar [8]

Los sistemas SBAS emplean puntos de referencia denominados *Ionospheric Grid Points* (IGP) para la monitorización y corrección de los efectos ionosféricos en los usuarios GNSS. Estos IGP conforman una malla de puntos distribuidos a una altitud fija de aproximadamente 350 km, con una separación de cinco

grados en latitud y longitud. En cada uno de estos puntos, el sistema SBAS analiza los datos de las estaciones de referencia para estimar el TEC y generar correcciones. Sin embargo, la determinación del TEC en los puntos intermedios se realiza mediante interpolación, lo que introduce errores en presencia de fuertes gradientes espaciales de ionización.

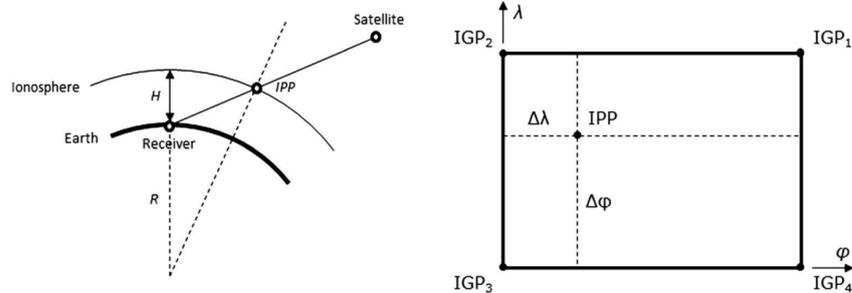


Figura 2-5. Ionospheric Grid Points

Durante periodos de alta actividad solar, la presencia de irregularidades ionosféricas más intensas compromete la validez de las suposiciones sobre la continuidad y suavidad del TEC en la malla de IGP. En particular, se observan tres efectos clave que degradan el rendimiento de SBAS:

- **Gradientes espaciales y temporales del TEC:** Durante picos de actividad solar, se observan fuertes gradientes en el contenido de electrones, lo que introduce errores significativos en los modelos ionosféricos utilizados para corregir los retardos en la señal GNSS.
- **Cintilaciones ionosféricas:** Variaciones rápidas en la amplitud y fase de las señales GNSS debido a pequeñas irregularidades en la ionosfera pueden degradar la precisión del posicionamiento e, incluso, provocar la pérdida de seguimiento de los satélites por parte de los receptores.
- **Tormentas ionosféricas:** En eventos de alta actividad solar, las perturbaciones del viento solar pueden alterar la ionosfera globalmente, causando grandes fluctuaciones en el TEC y reduciendo la fiabilidad de los sistemas GNSS.

Impacto en SBAS

Los SBAS, como el European Geostationary Navigation Overlay System (EGNOS), utilizan una red de estaciones de referencia para modelar la ionosfera y proporcionar correcciones diferenciales a los usuarios. Sin embargo, los efectos de la alta actividad solar pueden degradar su rendimiento de las siguientes maneras:

- **Errores en las correcciones ionosféricas:** La presencia de gradientes espaciales intensos en el TEC compromete la precisión de las estimaciones ionosféricas, lo que incrementa los errores en las correcciones de retardo y afecta la precisión del posicionamiento de los usuarios.
- **Aumento de la incertidumbre en la integridad:** Para garantizar la seguridad en aplicaciones críticas, como la aviación, SBAS establece límites de error en las correcciones transmitidas. Durante

eventos de alta actividad solar, estos límites pueden aumentar debido a la mayor variabilidad ionosférica, reduciendo la disponibilidad del servicio en ciertas regiones.

- **Interrupciones en la disponibilidad del servicio:** En escenarios de fuerte actividad ionosférica, los SBAS pueden declarar ciertos puntos de la malla ionosférica como "No Monitorizados" o "No Usables", afectando la continuidad del servicio y limitando su aplicabilidad en zonas críticas.

Casos Reales y Evaluación del Impacto [8]

Estudios previos han demostrado que, en periodos de máxima actividad solar, como los ocurridos durante el ciclo solar 24, se registraron pérdidas de disponibilidad del servicio SBAS en regiones cercanas al ecuador y en latitudes medias-bajas. Datos de EGNOS han mostrado degradaciones en la disponibilidad de servicio APV-I en el sur de Europa y el norte de África debido a perturbaciones ionosféricas que provocan errores en las correcciones transmitidas.

En conclusión, la alta actividad solar representa un desafío significativo para la operatividad de GNSS y SBAS, especialmente en regiones donde los efectos ionosféricos son más intensos. La evolución hacia sistemas de navegación multi-frecuencia y el desarrollo de modelos ionosféricos más robustos pueden mitigar algunos de estos efectos en el futuro, mejorando la fiabilidad y disponibilidad de los servicios de posicionamiento satelital.

2.3 Parámetros utilizados para medir la actividad solar y geomagnética

En esta sección se definen todos los parámetros que se han tenido en cuenta para la selección de los días con mayor y menor actividad solar. En los siguientes apartados se introduce cada indicador, se define su concepto y se explican los rangos típicos de valores asociados a condiciones de alta y baja actividad solar.

2.3.1 Índice Kp

El índice Kp se deriva del índice K, el cual es un código que se relaciona con las fluctuaciones máximas observadas en las componentes horizontales del campo magnético durante un intervalo de tres horas, en comparación con un día considerado "quieto". La conversión entre la amplitud máxima de la fluctuación (medida en nanoteslas, nT) y el valor del índice K se realiza mediante una tabla de conversión específica para cada observatorio.

En centros como el Space Weather Prediction Center (SWPC), se monitorizan los valores preliminares del índice K de forma continua, minuto a minuto, a partir de una red de observatorios que transmiten datos en tiempo casi real.

El índice Kp, por su parte, es un indicador planetario que representa un promedio ponderado de los índices K obtenidos en una red predeterminada de observatorios geomagnéticos, conformando lo que se conoce como la red oficial del Kp. Este índice global ofrece una valoración única de la actividad geomagnética en todo el planeta, permitiendo evaluar el nivel de entrada de energía del viento solar en la magnetosfera terrestre. Dado que algunos observatorios de la red oficial pueden no estar disponibles en tiempo real, el SWPC estima el valor del Kp utilizando datos de un subconjunto, generalmente ocho de los trece observatorios oficiales.

La red de estaciones colaboradoras cuenta con el apoyo de instituciones como el U.S. Geological Survey, Natural Resources Canada, British Geological Survey, el German Research Centre for Geosciences (GFZ)[9], Geoscience Australia, y con contribuciones adicionales de organismos como el Institut de Physique du Globe de Paris y el Korean Space Weather Center. Esta cooperación internacional permite obtener estimaciones casi en tiempo real del Kp, lo que resulta fundamental para emitir alertas y pronósticos ante condiciones de alta actividad solar [10], [11].

En la siguiente figura obtenida de la guía de usuario del centro NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) [12] se relaciona la actividad solar con el índice Kp. Se observa que un índice mayor o igual a 4 indica actividad alta, llegando hasta 9 para tormentas solares extremas.

<u>Category</u>	<u>A-index range</u>	<u>Typical values</u>
Quiet:	$0 \leq A_p < 10$	usually no Kp indices > 2+
Unsettled:	$10 \leq A_p < 20$	usually no Kp indices > 3+
Active:	$20 \leq A_p < 35$	a few Kp indices of 4
Minor Storm:	$35 \leq A_p < 60$	Kp indices mostly 4 and 5
Moderate Storm:	$60 \leq A_p < 100$	some Kp indices of 6
Strong Storm:	$100 \leq A_p < 160$	some Kp indices of 7
Severe Storm:	$160 \leq A_p < 310$	some Kp indices of 8 and 9-
Extreme Storm:	$310 \leq A_p$	some Kp indices of 9

Figura 2-6. Relación entre la actividad solar y el índice Kp

2.3.2 Índice Dst (Disturbance Storm Time)

El índice Dst (Disturbance Storm Time) es una medida crucial de la actividad geomagnética que se obtiene a partir de la monitorización de las variaciones en la componente horizontal del campo magnético en una red de observatorios situados en latitudes bajas, cerca del ecuador magnético. Este índice se utiliza para cuantificar la intensidad del "ring current" o corriente anular, una corriente eléctrica que circula en la magnetosfera a altitudes elevadas y que se intensifica durante las tormentas geomagnéticas.

Para calcular el índice Dst se analizan las variaciones horarias de la componente horizontal del campo magnético (componente H) en diversas estaciones de medición distribuidas globalmente en zonas de baja latitud. Estos registros se ajustan eliminando las tendencias de cambio secular (variaciones a largo plazo) mediante técnicas de análisis armónico, y se normalizan a valores equivalentes al ecuador

utilizando un factor coseno que depende de la latitud de cada estación. Este proceso permite aislar las fluctuaciones debidas exclusivamente a la corriente anular, que es responsable de la depresión global en el campo magnético durante las tormentas.[13]

En condiciones de calma, cuando la actividad solar es baja, el campo magnético terrestre permanece relativamente estable y el índice Dst se sitúa cerca de 0 nT (nanoteslas) o presenta leves valores positivos. Sin embargo, durante episodios de alta actividad solar –frecuentemente asociados a eventos como eyecciones de masa coronal (CME) o erupciones solares–, la inyección de partículas cargadas y la consiguiente intensificación de la corriente anular producen una disminución significativa en la magnitud de la componente horizontal del campo magnético. Este fenómeno se refleja en valores negativos del índice Dst. Se considera que cuando el Dst disminuye a valores entre -50 nT y -100 nT se está ante una tormenta geomagnética moderada. Cuando los valores bajan de -100 nT, se habla de tormentas geomagnéticas intensas. En estos casos, la depresión del campo magnético es tan marcada que tiene consecuencias directas en la ionosfera, afectando la propagación de señales de radio, la precisión de sistemas de navegación satelital y el funcionamiento de infraestructuras eléctricas y de telecomunicaciones.



Figura 2-7. Relación entre la actividad solar y el índice Dst

2.3.3 TEC (Total Electron Content)

El TEC (Total Electron Content) es un parámetro que cuantifica la cantidad total de electrones presentes en una columna vertical de la ionosfera, expresado en unidades conocidas como TECU (Total Electron Content Units). Este índice es esencial para evaluar el nivel de ionización atmosférica, ya que la densidad electrónica afecta directamente la propagación de señales electromagnéticas, particularmente aquellas empleadas en sistemas de navegación y comunicación como el GNSS (Global Navigation Satellite System).

La medición del TEC permite identificar y monitorear las variaciones en la ionosfera, las cuales están fuertemente condicionadas por diversos factores. En primer lugar, la hora del día juega un rol

determinante, ya que durante el día la radiación solar incrementa significativamente la ionización, mientras que en la noche, en ausencia de radiación directa, los niveles de TEC disminuyen notablemente. Asimismo, la estación del año influye: en verano, cuando la inclinación del sol favorece una mayor incidencia de radiación sobre la atmósfera, se registran niveles más altos de TEC, a diferencia del invierno, cuando esta incidencia es menor.

Otro factor importante es la latitud. Las regiones ecuatoriales, al recibir una mayor cantidad de radiación solar, tienden a presentar un TEC elevado en comparación con las zonas cercanas a los polos, donde la radiación es menos intensa. Además, la actividad solar tiene un impacto crítico sobre el TEC. Durante periodos de alta actividad solar, como aquellos caracterizados por erupciones o eyecciones de masa coronal (CME), la ionización aumenta significativamente, lo que se traduce en un TEC mucho más elevado que durante periodos de calma solar.[14]

Los valores TEC se interpretan de la siguiente forma:

- TEC bajo (<10 TECU): Indica poca ionización, común durante la noche, en latitudes altas o en periodos de baja actividad solar.
- TEC moderado (10–50 TECU): Representa condiciones normales, típicas durante el día en latitudes medias o durante amaneceres y atardeceres.
- TEC elevado (>50 TECU): Señala una alta ionización, usual en zonas ecuatoriales al mediodía o durante eventos de alta actividad solar, lo que puede afectar la precisión de sistemas GNSS y las comunicaciones.

2.3.4 Manchas solares (SN)

Las manchas solares son áreas oscuras en la superficie del Sol, conocidas como fotosfera, donde la intensa concentración de campos magnéticos inhibe el flujo convectivo de energía. Esto provoca que estas regiones sean relativamente más frías y, por ende, aparezcan más oscuras en contraste con el entorno circundante. Las manchas solares se utilizan como un importante indicador de la actividad solar, ya que su número y extensión varían de forma cíclica, siguiendo aproximadamente un ciclo de 11 años.

En condiciones de baja actividad solar, es decir, durante el mínimo solar, el número de manchas es muy reducido e incluso puede llegar a cero. Esta ausencia o baja cantidad de manchas indica que el Sol se encuentra en una fase de relativa calma, con una emisión energética moderada y menos eventos asociados a erupciones o eyecciones de masa coronal. Por ello, durante estos periodos, la influencia del Sol en la ionosfera y la magnetosfera de la Tierra es menor, lo que se traduce en condiciones más estables para las comunicaciones y la navegación.

Por otro lado, durante los periodos de alta actividad solar, o máximo solar, se observa un notable incremento en el número y tamaño de las manchas solares. En estos momentos, las manchas pueden agruparse formando complejos que indican regiones de alta actividad magnética. La abundancia de manchas está correlacionada con un incremento en la emisión de radiación en diversas longitudes de

onda, lo que influye en la ionización atmosférica y en la formación de fenómenos como erupciones solares y eyecciones de masa coronal. Estos eventos, a su vez, pueden desencadenar tormentas geomagnéticas que afectan a la infraestructura tecnológica terrestre.

El número de manchas solares se cuantifica mediante índices como el "Número de Manchas Solares Internacional", que combina el recuento individual de manchas y grupos de manchas. Este índice no solo sirve para monitorizar la actividad solar en el presente, sino que también permite realizar estudios históricos sobre la variabilidad solar y su impacto en el clima espacial y terrestre. Durante un máximo solar, es común registrar cifras elevadas en este índice, mientras que, en el mínimo solar, los valores son considerablemente bajos.[15]

La monitorización de las manchas solares es esencial para comprender la dinámica del Sol y predecir sus efectos en el entorno espacial. Un incremento en el número de manchas suele ser una señal temprana de que el Sol se está preparando para liberar mayor cantidad de energía, lo que podría dar lugar a eventos solares significativos. Estos eventos pueden, a su vez, afectar a la propagación de las ondas electromagnéticas en la Tierra, impactando en sistemas de comunicación y navegación, así como en la estabilidad de la red eléctrica.

2.3.5 Flujo solar F10.7

El flujo solar F10.7 es una medida de la radiación solar emitida en la banda de 10.7 cm (2800 MHz) y se expresa en unidades solares (sfu). Este índice es ampliamente utilizado como un parámetro del nivel de actividad solar, ya que está estrechamente relacionado con otros indicadores como el número de manchas solares y la intensidad de la radiación ultravioleta, elementos clave que influyen en la ionosfera y en el clima espacial.

La importancia del F10.7 radica en su capacidad para reflejar cambios en la actividad de la corona solar de manera rápida y confiable. Debido a que la medición de esta radiación es relativamente sencilla y robusta, el F10.7 se emplea tanto en estudios científicos como en aplicaciones operativas, como la predicción de las condiciones ionosféricas y la planificación de servicios de comunicación y navegación.

En condiciones de baja actividad solar, como ocurre durante los mínimos solares, los valores del F10.7 se sitúan generalmente en torno a 70–80 sfu. Durante estos periodos, la corona solar es menos activa y la emisión en la banda de 10.7 cm es más débil, lo que se traduce en una menor ionización de la atmósfera superior. Esta estabilidad en el flujo solar contribuye a condiciones ionosféricas relativamente homogéneas, facilitando la operación de sistemas que dependen de la propagación de señales electromagnéticas.

Por el contrario, en periodos de alta actividad solar –caracterizados por un incremento en la cantidad de manchas solares, erupciones y eyecciones de masa coronal (CME)– los valores del F10.7 pueden superar fácilmente los 200 sfu, e incluso alcanzar cifras mayores en situaciones extremas. Este incremento en la radiación refleja una mayor actividad en la corona solar, lo que a su vez intensifica la

ionización en la atmósfera superior y puede provocar alteraciones en la propagación de señales de radio y en la estabilidad de las comunicaciones satelitales y sistemas de navegación.

2.3.6 Eyecciones de Masa Coronal (CME)

Las eyecciones de masa coronal (CME) son grandes expulsiones de plasma y campos magnéticos que se liberan de la corona solar hacia el espacio interplanetario. Se producen durante eventos solares, como las erupciones y otras formas de actividad intensa en el Sol, y tienen el potencial de generar importantes perturbaciones en la magnetosfera terrestre.

En condiciones de baja actividad solar, las CME son menos frecuentes y tienden a ser menos intensas. Durante estos periodos, la corona solar se comporta de manera más estable, por lo que las eyecciones son esporádicas y, cuando ocurren, suelen presentar velocidades y densidades moderadas. Como resultado, su impacto en la Tierra es limitado, generando, en general, perturbaciones menores en el campo magnético y en la ionosfera.

Por el contrario, durante periodos de alta actividad solar (como los que se observan en el máximo solar) las CME se vuelven más frecuentes y exhiben características más extremas. En estos casos, las eyecciones pueden alcanzar velocidades muy elevadas y transportar cantidades significativas de plasma y energía. La interacción de estas CME intensas con la magnetosfera terrestre puede desencadenar tormentas geomagnéticas severas, afectando sistemas de comunicación, navegación satelital y otras infraestructuras tecnológicas. Además, las CME de alta actividad pueden generar ondas de choque en el medio interplanetario, intensificando aún más sus efectos sobre la Tierra [16].

2.4 Prestaciones de los sistemas SBAS (EGNOS)

En esta sección se presentan las prestaciones de los sistemas SBAS, focalizándonos en EGNOS, cuyo correcto desempeño es crucial para aplicaciones de navegación en entornos críticos. Se analizan las cuatro prestaciones fundamentales: integridad, continuidad, disponibilidad y precisión. Asimismo, se introducen las gráficas características que se utilizan en el estudio de estas prestaciones, permitiendo en secciones posteriores interpretar el impacto de la actividad solar en las distintas estaciones seleccionadas para el análisis.

2.4.1 Precisión

La precisión es la primera característica que evaluar en la certificación de un sistema de navegación, ya que define la diferencia entre la posición estimada y la posición real. Este parámetro se expresa de forma estadística mediante percentiles de la distribución de errores, lo que indica que, por ejemplo, si

se utiliza el percentil 95, el 95% de las mediciones tendrán un error igual o inferior a ese valor. El concepto de precisión se utiliza generalmente para medir la precisión del posicionamiento, pero también puede utilizarse para medir la precisión de la velocidad e incluso la precisión de la sincronización.

Para cuantificar la precisión se emplean diversas métricas, entre las que destacan [17]:

- Percentiles (50%, 95%, 99%): Estos valores indican el porcentaje de mediciones cuya desviación respecto a la posición real es menor o igual a un determinado umbral. Por ejemplo, una precisión de 5 m (95%) significa que en el 95% de las ocasiones el error de posicionamiento no supera los 5 metros.
- Circular Error Probable (CEP): Corresponde al percentil 50 en una distribución bidimensional, es decir, el 50% de las mediciones presentan un error inferior a este valor.
- Error Cuadrático Medio (rms): Se calcula como la raíz cuadrada del promedio de los errores al cuadrado y, bajo la suposición de que los errores se distribuyen normalmente, este valor se correlaciona aproximadamente con el percentil 68% para distribuciones unidimensionales y con el 63% para distribuciones bidimensionales.
- Desviación Estándar (σ) y Multiplos de σ : La desviación estándar es una medida que permite conocer la dispersión del error. Bajo distribuciones normales, 1σ corresponde al percentil 68% en una dimensión, y se pueden expresar medidas de precisión como 2σ o 3σ para describir márgenes de error mayores.

La relación entre estos distintos parámetros permite convertir y comparar las mediciones de precisión, lo cual es esencial para evaluar y validar el rendimiento de un sistema de navegación.

En el ámbito de la navegación aérea, se utiliza mayoritariamente el percentil 95 para expresar la precisión, lo que garantiza que en el 95% de las situaciones el error de posicionamiento estará dentro de un límite aceptable. La Organización de Aviación Civil Internacional (OACI) establece requisitos precisos para las aproximaciones LPV-200, exigiendo un error máximo de 16 m en la componente horizontal y entre 4 y 6 m en la vertical.

Los sistemas SBAS, como EGNOS, superan ampliamente estos requerimientos, presentando errores en torno a 1 m en la dirección horizontal y entre 2.1 y 2.5 m en la vertical. Esta diferencia es especialmente notable en comparación con otros servicios, como el APV-I, que muestra una precisión vertical significativamente inferior, con errores alrededor de 20 m.

Las gráficas de HNSE (Horizontal Navigation System Error) y VNSE (Vertical Navigation System Error) son herramientas fundamentales para evaluar la precisión y el desempeño del sistema de navegación. Estas representaciones, presentadas generalmente en forma de histogramas y funciones de distribución acumulada, permiten analizar de manera visual cómo se distribuyen los errores en la posición estimada frente a la posición real, tanto en la dimensión horizontal como en la vertical.

En ambas gráficas, el eje X representa la magnitud del error, medido en metros. En el caso de HNSE, se muestra el error en la componente horizontal, mientras que en VNSE se refleja el error vertical.

El eje Y indica, dependiendo de la representación, la frecuencia o la probabilidad acumulada de que el error sea inferior o igual a un determinado valor.

A continuación, se puede observar un ejemplo para cada una de este tipo de graficas, obtenidas del reporte mensual de enero de 2025 de EGNOS [18]:

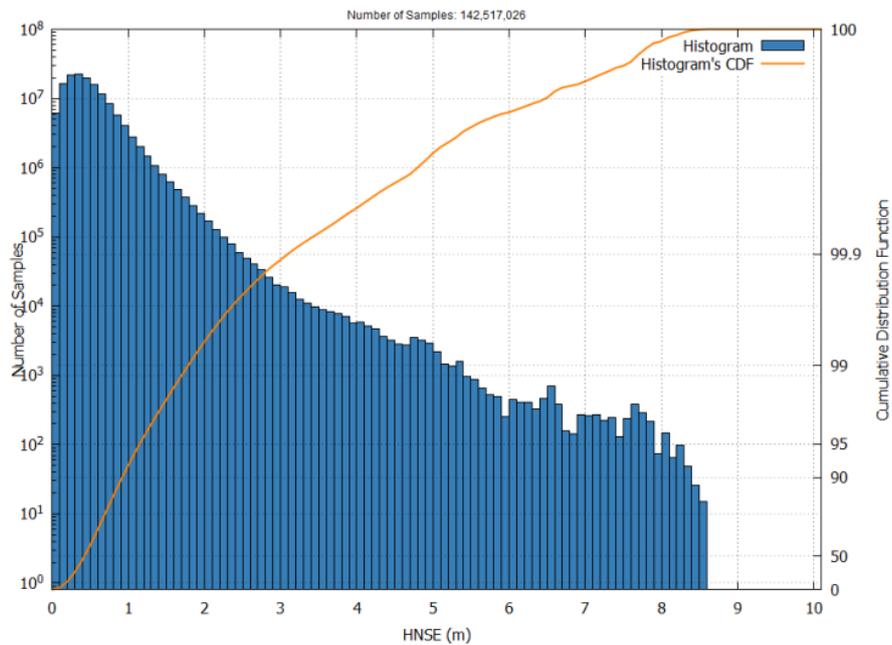


Figura 2-8. EGNOS LPV-200 HNSE Histograma y probabilidad acumulada enero de 2025

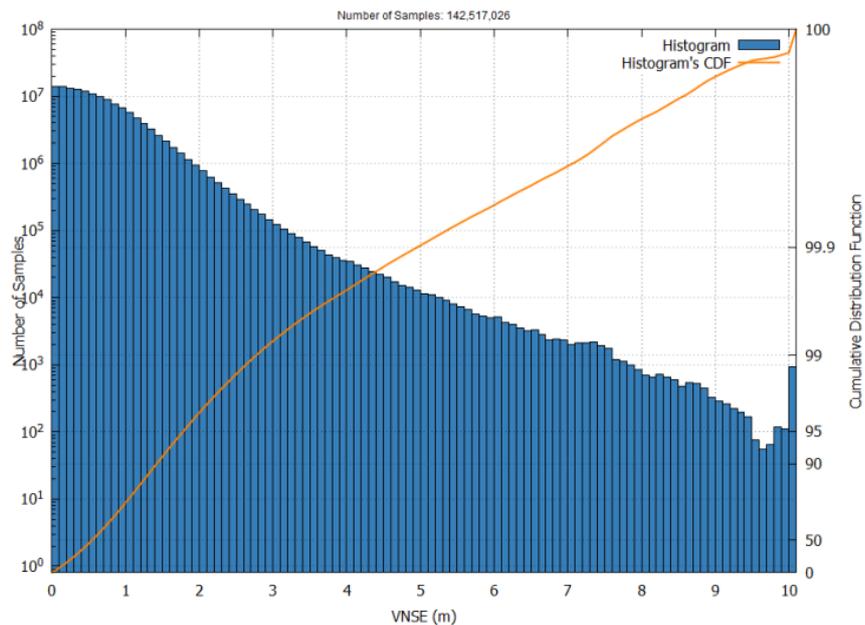


Figura 2-9. EGNOS LPV-200 VNSE Histograma y probabilidad acumulada enero de 2025

2.4.2 Integridad

La integridad es la medida de la confianza que se puede tener en la correctitud de la información ofrecida por un sistema de navegación [19]. El sistema SBAS ofrece información de navegación de confianza, garantizando que cualquier fallo o degradación en la señal se detecte y se comuniquen de manera oportuna al usuario. Esto permite que, en caso de que se produzca un error que supere un umbral de seguridad preestablecido, el sistema alerte inmediatamente a los operadores, minimizando los riesgos asociados a decisiones basadas en información errónea.

Antes de profundizar en el análisis de la integridad, es necesario definir algunos conceptos fundamentales [20]:

- **Alert Limit (AL):** Es el límite de alerta, es decir, la tolerancia máxima al error de posición que el sistema puede soportar antes de emitir una advertencia al usuario.
- **Time to Alert (TTA):** Representa el tiempo máximo permitido desde el momento en que el error de posición excede los límites de tolerancia hasta que el sistema emite la alerta.
- **Integrity Risk (IR):** Se refiere a la probabilidad de que, en un instante dado, el error de posición supere el límite de alerta, comprometiendo la seguridad de la operación.
- **Protection Level (PL):** Es un error estadístico que define un umbral de protección. Garantiza que la probabilidad de que el error absoluto de posición supere este valor sea igual o menor al riesgo de integridad aceptable.

Para evaluar y representar la integridad de un sistema SBAS se utilizan principalmente dos herramientas: los índices de seguridad y los diagramas Stanford.

Índices de Seguridad

El índice de seguridad se obtiene al relacionar el error de posición del sistema de navegación con el nivel de protección (PL). Este índice es fundamental, ya que, para una operación segura, su valor debe ser menor que 1. En sistemas SBAS como EGNOS, por ejemplo, este índice se sitúa habitualmente por debajo de 0.5, lo que indica un amplio margen de seguridad y una alta confiabilidad en la precisión del servicio.

Diagramas Stanford [20]

Los diagramas Stanford son representaciones gráficas en las que se sitúa el error de posición en el eje horizontal (x) y el nivel de protección (PL) en el eje vertical (y). Un elemento central de estos diagramas es la línea diagonal discontinua que representa los puntos en los que el error de posición es igual al nivel de protección. Esta línea permite diferenciar dos regiones fundamentales:

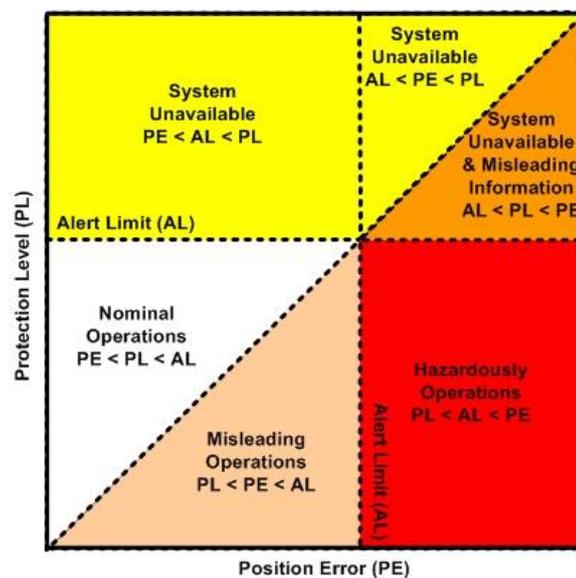


Figura 2-10. Diagrama de Standford

- Zona Superior a la Diagonal:
 - En esta área el nivel de protección es mayor que el error de posición, lo que indica que el sistema mantiene la integridad. Dentro de esta zona se distinguen dos subregiones:
 - Zona de Operaciones Normales: Aquí, además de que el error está cubierto por el PL, éste último es inferior al límite de alerta (AL). Esta es la región óptima para operaciones seguras.
 - Zona de Servicio No Disponible: Se identifica cuando el nivel de protección supera el límite de alerta, implicando que, aunque el error pueda estar dentro del PL, no se garantiza la seguridad operativa y el servicio se declara no disponible.
- Zona Inferior a la Diagonal:

En esta región, el error de posición excede el nivel de protección, lo que significa que el sistema no cumple con los requisitos de integridad. Se subdivide en dos zonas:

- Información Engañosa (MI): Ocurre cuando el sistema, declarado disponible, presenta un error de posición que supera el nivel de protección, pero no el límite de alerta. Esto implica un riesgo potencial sin que se active una alerta.
- Información Altamente Engañosa (HMI): Se da cuando el error de posición no solo excede el nivel de protección, sino que también supera el límite de alerta, comprometiendo seriamente la seguridad de la operación al no advertir al usuario.

Además, se utilizan diagramas de alerta para analizar de forma separada la componente vertical y horizontal del error de posición, lo que permite una evaluación más precisa de la integridad en función de la dirección del error. La dispersión de los puntos y su proximidad a la diagonal son indicadores críticos: cuanto más cercana se encuentre la nube de puntos a la diagonal, menor será el margen de seguridad y mayor la probabilidad de un fallo inminente en la integridad.

Otras gráficas empleadas para el análisis de la integridad son las gráficas del Índice de Seguridad Horizontal (HSI) y del Índice de Seguridad Vertical (VSI). Ambas gráficas representan, en forma de histograma o función de distribución acumulada, el comportamiento del cociente entre el error de navegación (ya sea horizontal o vertical) y el nivel de protección (PL) en cada instante de tiempo.

Cuando el HSI o VSI es inferior a 1, el error horizontal se encuentra dentro del nivel de protección, lo que significa que el sistema opera de manera segura. Una concentración de valores muy bajos (lejos de 1) indica un amplio margen de seguridad. Por otro lado, si se observan valores cercanos o superiores a 1, se estaría señalando una situación en la que el error horizontal se aproxima o excede el nivel de protección, pudiendo derivar en una situación de Información Engañosa (MI) o, en casos más críticos, en Información Altamente Engañosa (HMI).

A continuación, se puede observar un ejemplo para cada una de este tipo de gráficas, obtenidas del reporte mensual de enero de 2025 de EGNOS [18]:

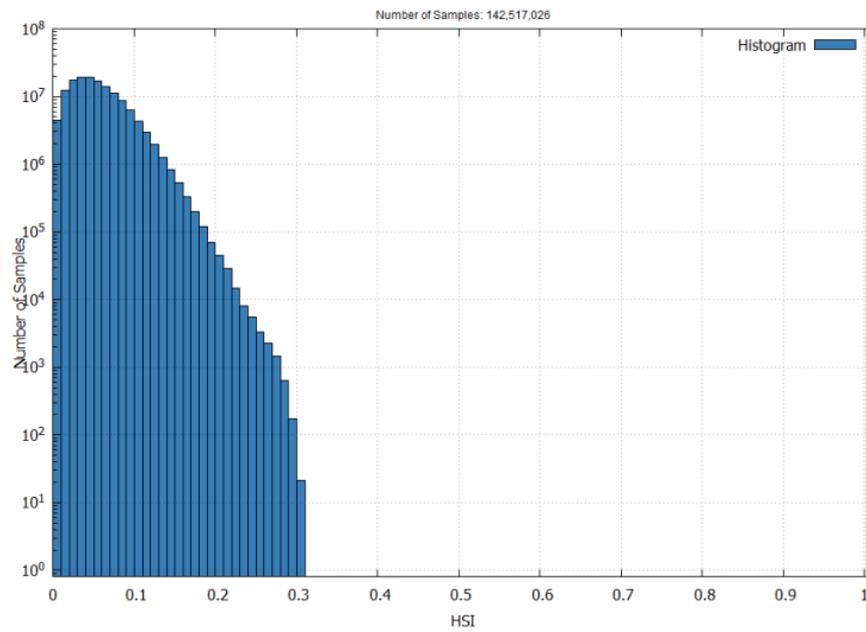


Figura 2-11. EGNOS APV-I Horizontal Safety Index [HSI] enero de 2025

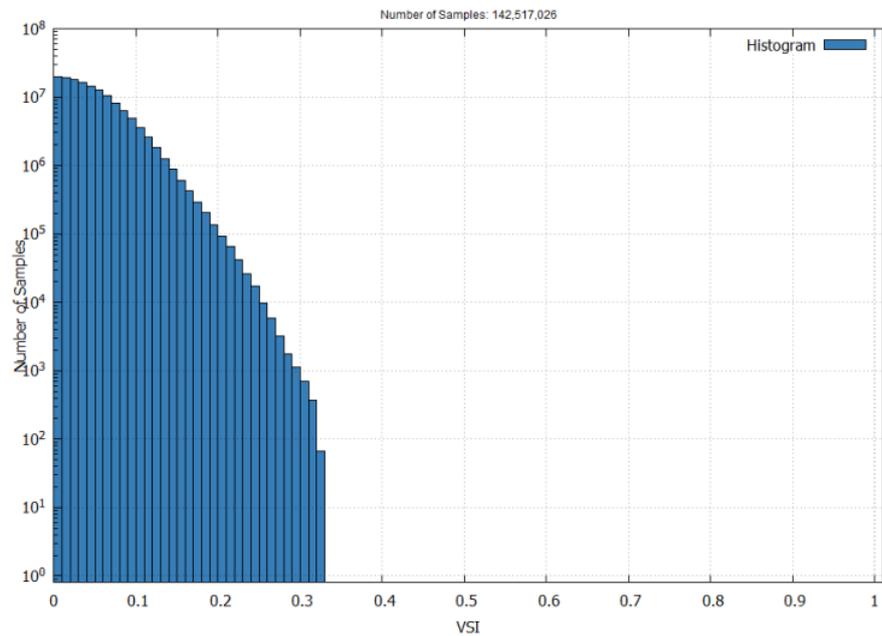


Figura 2-12. EGNOS APV-I Vertical Safety Index [VSI] enero de 2025

2.4.3 Continuidad

La continuidad se define como la probabilidad de que el sistema mantenga su funcionamiento especificado durante la duración de una fase operativa determinada. En el ámbito de la navegación aérea, esta característica se cuantifica como la probabilidad de que la capacidad operativa del sistema se conserve sin interrupciones programadas durante un intervalo de tiempo específico [19].

Existen diferentes categorías de errores que pueden afectar la continuidad de un sistema SBAS [21]:

- **Fallos Graves (Hard Failures):** Estos errores provocan el cese de la emisión de la señal GNSS y pueden ocurrir de manera repentina o gradual. Se subdividen en:
 - Fallos a Largo Plazo (LT): Pérdida irreparable de la señal, que generalmente requiere la sustitución del satélite afectado mediante el lanzamiento de uno nuevo.
 - Fallos a Corto Plazo (ST): Pérdida temporal de la señal, donde la solución consiste en cambiar a un satélite redundante para mantener la operatividad del sistema.
- **Fallos por Desgaste:** Son errores usualmente predecibles y característicos de satélites en la fase operativa end-of-life (EOL). Se tratan de fallos LT, ya que indican una degradación que conduce a la eventual pérdida de la señal.
- **Fallos Leves:** Se consideran fallos de integridad, en los que el sistema sigue funcionando sin emitir una alerta de fallo de integridad. No obstante, el Segmento de Control detecta y alerta sobre estos errores tan pronto como se producen, permitiendo tomar medidas correctivas.

Desempeño Real Según el Reporte de enero 2025

El EGNOS Monthly Performance Report de enero 2025 [18] aporta información concreta sobre la continuidad operativa de los servicios EGNOS. Según el informe, la cobertura de continuidad alcanzada fue:

- 93,05% para el servicio APV-I
- 83,58% para el servicio LPV-200

Estos valores se obtuvieron utilizando una ventana de 15 segundos y evaluando un riesgo de continuidad de 5×10^{-4} .

Es importante destacar que, para operaciones LPV-200, las directrices de seguridad (basadas en los requerimientos de la OACI) exigen un riesgo de continuidad máximo de 10^{-4} . Por lo tanto, la cifra de 5×10^{-4} para LPV-200 implica que el sistema no cumple plenamente con el nivel mínimo de continuidad exigido para este tipo de operaciones. No obstante, la OACI permite la utilización de sistemas de navegación que no alcancen de manera estricta este umbral, siempre que se implementen medidas compensatorias que mitiguen el impacto de esta deficiencia en la seguridad operacional.

A continuación, se puede observar un ejemplo de una gráfica de continuidad, obtenida del reporte mensual de enero de 2025 de EGNOS [18]:

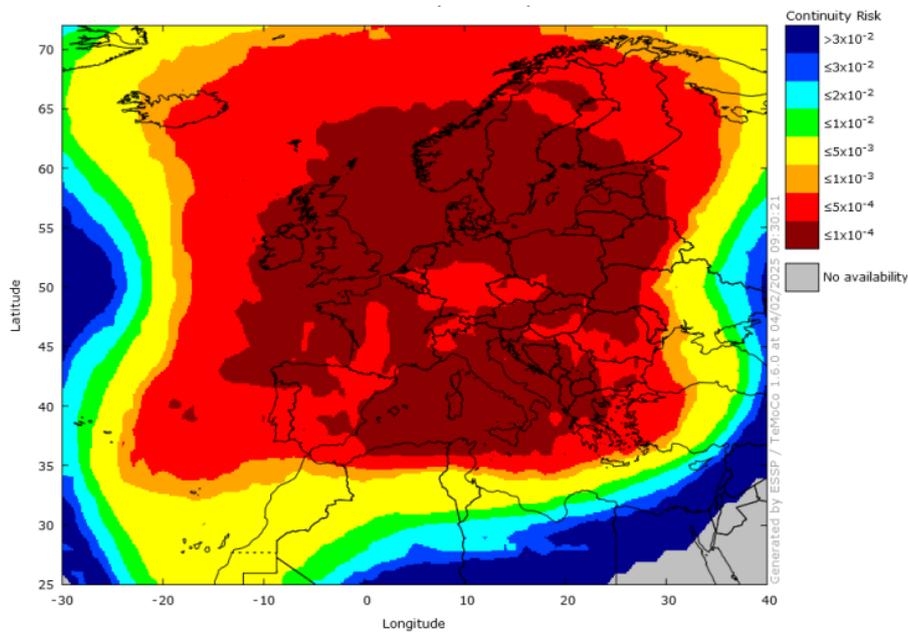


Figura 2-13. EGNOS APV-I Continuidad en enero de 2025

2.4.4 Disponibilidad

La disponibilidad es el porcentaje de tiempo durante el cual los servicios de navegación del sistema son utilizables, y constituye una medida esencial de la capacidad del sistema para proporcionar un servicio fiable dentro de su área de cobertura. En otras palabras, se refiere al tiempo en que un usuario, receptor o aplicación puede acceder a una señal de navegación adecuada, lo que resulta fundamental para garantizar operaciones seguras y continuas [19].

La disponibilidad de un sistema depende tanto de las características físicas del entorno (como la visibilidad de la constelación, condiciones atmosféricas o interferencias) como de las capacidades técnicas de las infraestructuras de transmisión. La configuración de la constelación, junto con la capacidad para bloquear señales de múltiples satélites, juega un papel crucial en garantizar que la señal esté disponible de manera continua [22].

Además, en ciertos casos se pueden imponer restricciones adicionales: si una aplicación requiere que la solución de navegación presente un error inferior a un umbral determinado, el sistema se considerará disponible solo cuando se cumpla ese criterio. Esta aproximación es posible únicamente si el sistema ofrece integridad adecuada o existe un sistema de referencia para medir los errores de la señal.

En el caso de EGNOS, el sistema cumple con los requisitos de disponibilidad establecidos por la OACI, al garantizar que la señal SBAS esté disponible más del 99% del tiempo en prácticamente toda Europa. Este elevado porcentaje asegura que, a pesar de posibles variaciones en la visibilidad o condiciones ambientales adversas, el servicio de navegación se mantiene utilizable, proporcionando una base fiable para operaciones críticas [18].

A continuación, se puede observar un ejemplo de una gráfica de disponibilidad, obtenida del reporte mensual de enero de 2025 de EGNOS [18]:

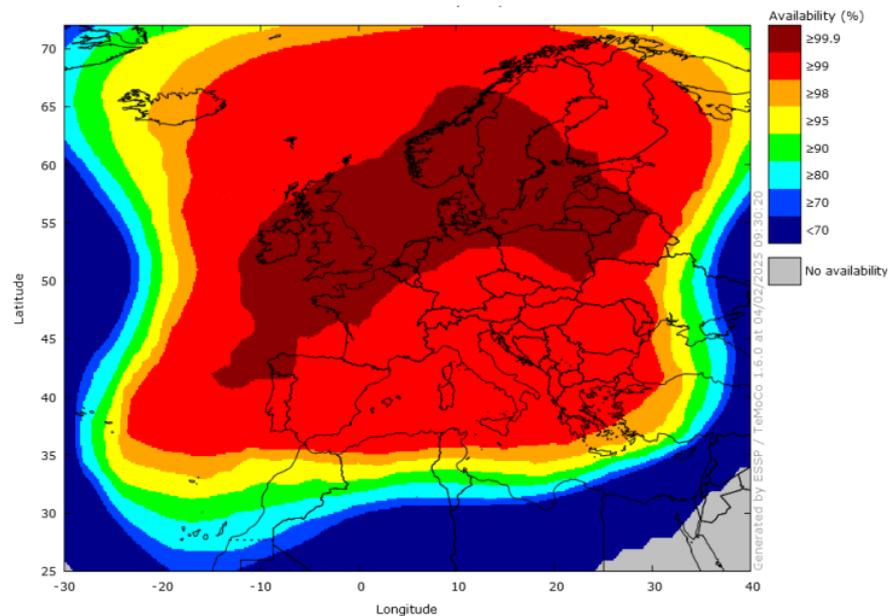


Figura 2-14. EGNOS APV-I Disponibilidad en enero de 2025

2.5 Datos y formatos utilizados para el análisis de EGNOS

En esta sección se explican ficheros de gran interés para el estudio de este proyecto.

2.5.1 Mensajes SBAS y correcciones ionosféricas

Los mensajes EGNOS SBAS son fundamentales para garantizar que la información de corrección y mejora de la señal GNSS se transmita de manera eficiente y confiable a los usuarios. Cada mensaje se compone de cuatro secciones claramente definidas, que facilitan su decodificación y aseguran la sincronización y la integridad de los datos. A continuación, se describen estas secciones [6]:

- **Preámbulo (Bits 0-7):** Esta sección inicial se utiliza para asegurar la sincronización de tramas, permitiendo que el receptor identifique el comienzo de un mensaje.
- **Identificador del Tipo de Mensaje (Bits 8-13):** En esta parte se define el tipo de mensaje que se está transmitiendo. Aunque el campo permite definir hasta 64 tipos distintos, actualmente solo se han especificado 20 tipos de mensajes, que se agrupan en categorías según la información que contienen.
- **Campo de Datos (Bits 14-225):** Aquí se encuentra la información principal del mensaje, que varía en función del tipo de mensaje. Este campo contiene los datos específicos que el sistema SBAS transmite para correcciones, integridad, parámetros ionosféricos, entre otros.
- **Información de Paridad (Bits 226-249):** Esta sección se encarga de la redundancia y del control de errores, permitiendo al receptor verificar la integridad del mensaje recibido.

Cada mensaje EGNOS se transmite a una tasa de 250 bits por segundo, de modo que se espera recibir un mensaje de tipo específico cada segundo, lo cual asegura una actualización constante de la información crítica para la navegación.

Los 20 tipos de mensajes actualmente definidos se agrupan en tres categorías principales:

- **Mensajes de Información Satelital:**

Estos mensajes contienen datos esenciales sobre el estado y la posición de los satélites, y permiten la monitorización y corrección rápida de errores en la órbita y en el reloj de los satélites. Ejemplos de estos mensajes son:

- **MT 1:** Asignación de máscara PRN, que indica cuáles de los satélites posibles están siendo monitorizados.
- **MT 2-5:** Correcciones rápidas, que corrigen variaciones rápidas en la efeméride y en los errores de reloj de los satélites GPS.
- **MT 6:** Información de integridad, utilizada para alertar sobre condiciones anómalas o para actualizar correcciones rápidas.
- **MT 7:** Factor de degradación de correcciones rápidas, que ayuda a determinar el intervalo de expiración de dichas correcciones en función de las fases de vuelo.
- **MT 9:** Mensaje de navegación geo (con información de posición, tiempo, etc.), que proporciona la efeméride GEO y la precisión de rango del usuario.
- **MT 17:** Almanagues de satélites GEO, que ofrecen información sobre la salud y el estado de los satélites para propósitos de adquisición.
- **MT 24 y MT 25:** Correcciones de errores satelitales, tanto rápidas (en situaciones donde el número de satélites es limitado) como de largo plazo.
- **MT 28:** Mensaje de matriz de covarianza de efeméride de reloj, que, aunque no obligatorio, proporciona información sobre la covarianza relativa.

■ Mensajes Relacionados con la Ionosfera:

Estos mensajes están diseñados para mejorar la precisión de las correcciones ionosféricas, fundamentales para la precisión del posicionamiento.

- MT 18: Máscara de puntos de la cuadrícula ionosférica, donde cada bit indica si se está proporcionando información para un punto específico de la cuadrícula.
- MT 26: Correcciones de retardo ionosférico, que permiten calcular las correcciones necesarias o determinar la demora vertical ionosférica en la cuadrícula.

■ Otros Mensajes:

Esta categoría abarca mensajes complementarios que abarcan desde pruebas internas hasta parámetros operativos y de degradación.

- MT 0: Mensaje de prueba SBAS, que indica que, al recibirse, no se garantiza la integridad del sistema.
- MT 10: Parámetros de degradación, utilizados para calcular los parámetros de degradación de las correcciones rápidas, a largo plazo y ionosféricas.
- MT 12: Parámetros de sincronización de la red SBAS con el Tiempo Universal Coordinado (UTC).
- MT 27: Mensaje de servicio SBAS, que define la región geográfica de servicio.
- MT 62: Mensaje de pruebas internas, emitido únicamente con fines de testeo.
- MT 63: Mensaje nulo, enviado cuando no hay otro tipo de mensaje disponible.

2.5.2 RINEX de navegación y observación

El formato RINEX (Receiver Independent Exchange Format) es un estándar para el intercambio de datos brutos de sistemas de navegación por satélite, que permite recolectar y procesar de manera uniforme los observables esenciales. Estos observables incluyen mediciones de fase portadora, pseudorángos (medidas de código) y la hora de observación, los cuales son fundamentales para determinar con precisión la posición de un receptor.

Originalmente desarrollado en 1989 para la campaña europea EUREF 89, RINEX ha evolucionado a través de varias versiones para incluir datos de múltiples constelaciones. Mientras que la versión 1 se centraba en GPS, la versión 2 amplió el soporte para sistemas como GLONASS y SBAS; la versión 3 añadió compatibilidad con BeiDou, QZSS e IRNSS, y la versión 4 (publicada en 2021) está diseñada para manejar los nuevos mensajes de todas las constelaciones GNSS, correcciones ionosféricas, parámetros de orientación terrestre y compensaciones de tiempo del sistema.

El formato RINEX se organiza en distintos tipos de archivos:

- Archivos de Observación: Contienen los datos crudos medidos en cada estación, es decir, las observaciones de pseudorango y fase portadora en una sesión determinada.

- Archivos de Navegación: Recogen los mensajes de navegación transmitidos por los satélites, incluyendo información sobre órbitas y correcciones de reloj.
- Archivos de Relojes: Incluyen las correcciones de los relojes satelitales y de los receptores.

Esta estandarización permite que diferentes programas de procesamiento geodésico y de navegación utilicen los mismos datos sin depender de un formato propietario, lo que facilita la interoperabilidad.

En los sistemas SBAS (Satellite-Based Augmentation Systems) como EGNOS, los archivos RINEX son fundamentales para la generación de correcciones y mejoras en la señal GNSS. Los SBAS utilizan datos recolectados de redes de estaciones de referencia que emplean el formato RINEX para:

- Calcular y difundir correcciones en las órbitas de los satélites y en sus relojes.
- Estimar y corregir los errores ionosféricos y otros sesgos.
- Evaluar la integridad, precisión, continuidad y disponibilidad de la señal GNSS, aspectos críticos para la navegación segura.

Al disponer de un formato común y ampliamente adoptado, los SBAS pueden integrar datos de diversas fuentes y constelaciones, garantizando que las correcciones transmitidas a los usuarios finales sean consistentes y fiables. Esta capacidad de procesamiento y difusión de datos de alta calidad es la que permite a los sistemas SBAS ofrecer servicios de navegación con los estándares exigidos para aplicaciones de seguridad de vida en la aviación.

2.5.3 Formato de los distintos ficheros GNSS

Para más información sobre el formato empleado por los ficheros, tanto los mensajes SBAS como los RINEX de navegación y observación, la Universidad Politécnica de Cataluña ha creado una página en la cual se muestran varios formatos según el fichero y su versión [23]. Esta plataforma ofrece además información campo a campo para una completa explicación del fichero a analizar.

Observation RINEX 4.0 Format

4.0	OBSERVATION DATA	M (MIXED)	RINEX VERSION / TYPE
BLANK OR G = GPS, R = GLONASS, E = GALILEO, M = MIXED			COMMENT
gLAB	gAGE	20191209 121400 UTC	PGM / RUN BY / DATE
EXAMPLE OF A MIXED RINEX FILE			COMMENT
MRKR			MARKER NAME
9080.1.34			MARKER NUMBER
GEODETTIC			MARKER TYPE
gAGE	UPC: Technical University of Catalonia		OBSERVER / AGENCY
THIS FILE IS PART OF THE gLAB TOOL SUITE			COMMENT
FILE PREPARED BY: YANFENG DONG			COMMENT
PLEASE EMAIL ANY COMMENT OR REQUEST TO: glab.gage @ upc.edu			COMMENT
IR2200716006	ASHTECH UZ-12	CQ00	REC # / TYPE / VERS
482	AOAD/M_T	NONE	ANT # / TYPE
4789028.4701	176610.0133	4195017.0310	APPROX POSITION XYZ
0.9030	0.0000	0.0000	ANTENNA: DELTA H/E/N
0.0000	0.0000	0.0000	ANTENNA: DELTA X/Y/Z
G C1C 0.9030	0.0000	0.0000	ANTENNA: PHASECENTER
0.0000	0.0000	0.0000	ANTENNA: B.SIGHT XYZ
0.0000	0.0000	0.0000	ANTENNA: ZERODIR AZI
0.0000	0.0000	0.0000	ANTENNA: ZERODIR XYZ
0.0000	0.0000	0.0000	CENTER OF MASS: XYZ
C 28 C2I C2X C5X C6I C7I C7Z C8X D2I D2X D5X D6I D7I D7Z			SYS / # / OBS TYPES
D8X L2I L2X L5X L6I L7I L7Z L8X S2I S2X S5X S6I S7I			SYS / # / OBS TYPES
S7Z S8X			SYS / # / OBS TYPES
E 20 C1X C5X C6X C7X C8X D1X D5X D6X D7X D8X L1X L5X L6X			SYS / # / OBS TYPES
L7X L8X S1X S5X S6X S7X S8X			SYS / # / OBS TYPES
G 20 C1C C1W C2W C2X C5X D1C D1W D2W D2X D5X L1C L1W L2W			SYS / # / OBS TYPES
L2X L5X S1C S1W S2W S2X S5X			SYS / # / OBS TYPES
R 20 C1C C1P C2C C2P C3X D1C D1P D2C D2P D3X L1C L1P L2C			SYS / # / OBS TYPES
L2P L3X S1C S1P S2C S2P S3X			SYS / # / OBS TYPES
S 4 C1C C5I D1C D5I L1C L5I S1C S5I			SYS / # / OBS TYPES
DBHZ			SIGNAL STRENGTH UNIT
30.000			INTERVAL
2019 7 19 0 0 0.0000000	GPS		TIME OF FIRST OBS
2019 7 19 23 59 30.0000000	GPS		TIME OF LAST OBS
1			RCV CLOCK OFFS APPL
G CC2NONCC	p1c1bias.hist @ goby.nrl.navy.mil		SYS / DCBS APPLIED
G PAGES	igs05.atx @ igsbc.jpl.nasa.gov		SYS / PCVS APPLIED
C 1 28 C2I C2X C5X C6I C7I C7Z C8X D2I D2X D5X D6I D7I			SYS / SCALE FACTOR
D7Z D8X L2I L2X L5X L6I L7I L7Z L8X S2I S2X S5X			SYS / SCALE FACTOR
S6I S7I S7Z S8X			SYS / SCALE FACTOR
E 1 20 C1X C5X C6X C7X C8X D1X D5X D6X D7X D8X L1X L5X			SYS / SCALE FACTOR

Figura 2-15. Formato del principio de RINEX 4.0 de Observación

2.6 Normativa OACI y uso de SBAS en la aviación

La normativa de la Organización de Aviación Civil Internacional (OACI) en materia de navegación se ha transformado progresivamente desde los sistemas basados en ayudas terrestres hasta las modernas operaciones basadas en GNSS (Global Navigation Satellite System), pasando por el concepto de PBN (Performance Based Navigation), que engloba las operaciones RNAV y RNP. En este contexto, los sistemas SBAS (Satellite-Based Augmentation Systems) han sido un elemento clave para mejorar la precisión, integridad, continuidad y disponibilidad de la navegación aérea, permitiendo la implementación de aproximaciones avanzadas como APV (Approach with Vertical Guidance) y, en particular, LPV (Localizer Performance with Vertical Guidance).

2.6.1 Principios Fundamentales: PBN, RNAV y RNP

Performance Based Navigation (PBN) es el enfoque que define las especificaciones de navegación basadas en el rendimiento requerido, en lugar de depender exclusivamente de la infraestructura de ayudas terrestres. Este paradigma se sustenta en dos conceptos esenciales [24]:

- RNAV (Area Navigation): Permite que una aeronave siga cualquier trayectoria deseada entre dos o más puntos sin necesidad de sobrevolar ayudas de navegación fijas. Esto otorga una mayor flexibilidad en la planificación de rutas y en la optimización de los trayectos.
- RNP (Required Navigation Performance): Es una evolución de RNAV que, además de permitir la navegación en áreas sin cobertura de ayudas terrestres, incorpora funciones de monitoreo y alerta. El sistema RNP exige que el rendimiento de la navegación cumpla con unos niveles predefinidos de precisión, integridad, continuidad y disponibilidad; de este modo, se garantiza que cualquier desviación significativa se detecte a tiempo para alertar a la tripulación.

Estas capacidades, basadas en PBN, han revolucionado la manera en que se conciben y ejecutan las operaciones de navegación, permitiendo la optimización del espacio aéreo y la introducción de rutas más directas y eficientes.

2.6.2 Introducción de GNSS y SBAS en la aviación

El advenimiento de los sistemas GNSS, como el GPS, combinados con la integración de SBAS (por ejemplo, EGNOS en Europa, WAAS en Norteamérica y MSAS en Japón), ha permitido alcanzar niveles de desempeño que cumplen los exigentes requisitos de la aviación moderna. Los SBAS amplían la cobertura y mejoran la precisión del GNSS al corregir errores y proporcionar alertas de integridad en tiempo real. Esto es fundamental para operaciones de seguridad de vida, ya que garantiza que la información de navegación se mantenga dentro de unos límites de error muy estrictos.

2.6.3 Evolución de las Aproximaciones: De APV a LPV

Con la consolidación de la tecnología GNSS y la implementación de SBAS, se han desarrollado nuevas categorías de aproximaciones que han sustituido en gran medida a los métodos tradicionales basados en ILS (Instrument Landing System). Entre estas, destacan:

- APV (Approach with Vertical Guidance): Son procedimientos de aproximación que, mediante el uso de GNSS y SBAS, proporcionan orientación vertical durante la fase final de la aproximación. Aunque ofrecen una mejora significativa respecto a las aproximaciones sin guía vertical, los APV tradicionales pueden presentar limitaciones en términos de precisión vertical, alcanzando errores en torno a los 20 m.

- LPV (Localizer Performance with Vertical Guidance): Representan la evolución de los APV. Las aproximaciones LPV ofrecen un nivel de precisión y una integridad equiparable a la de los sistemas basados en ILS. Los requerimientos de la OACI para las operaciones LPV-200, por ejemplo, establecen un error máximo de 16 m en la componente horizontal y entre 4 y 6 m en la vertical. Los sistemas SBAS, en particular EGNOS, han demostrado superar estos límites con errores horizontales cercanos a 1 m y verticales entre 2.1 y 2.5 m, garantizando así una mayor seguridad en las operaciones de aproximación.

2.6.4 Requisitos de la Normativa OACI para Aproximaciones GNSS

La OACI ha establecido una serie de parámetros que deben cumplirse para que un sistema de navegación se considere apto para operaciones de seguridad de vida. Entre los principales requisitos se encuentran:

- Precisión: Se especifica mediante percentiles (generalmente el 95%) de la distribución de errores. Las aproximaciones LPV deben cumplir con límites estrictos, como el mencionado error horizontal de 16 m y error vertical de entre 4 y 6 m, mientras que los APV tradicionales tienen requisitos menos exigentes.
- Integridad: Es la medida de confianza en la información proporcionada por el sistema. La integridad implica que cualquier error o degradación en la señal sea detectado y comunicado al usuario en un tiempo muy corto (definido mediante parámetros como Alert Limit y Time to Alert). Esto permite que, en caso de que se produzca un fallo, se active una alerta antes de que la seguridad de la operación se vea comprometida.
- Continuidad y Disponibilidad: Se evalúa el porcentaje de tiempo en el que el sistema opera sin interrupciones y proporciona la señal necesaria. La disponibilidad, debe ser mayor al 99% en la mayoría de las regiones, garantizando que los servicios de navegación estén siempre disponibles para la operación. En cuanto a la continuidad, la OACI establece como requisito que el índice no debe encontrarse entre 1 y $8 \cdot 10^{-6} / 15s$ y EGNOS promete cumplir con valores entre 1 y $1 \cdot 10^{-4} / 15s$.

3 Metodología de análisis

3.1 Selección de días de estudio

Para llevar a cabo un análisis representativo del impacto de la actividad ionosférica sobre el rendimiento de GNSS, se seleccionaron los días de mayor y menor actividad solar dentro del periodo comprendido entre agosto y diciembre de 2024. La elección de estos días se basó en diversos parámetros indicativos de la actividad solar y geomagnética, los cuales se detallan en la sección Parámetros utilizados para medir la actividad solar y geomagnética.

Los días finalmente seleccionados para el estudio fueron los siguientes:

Tabla 3-1. Días seleccionados para el análisis

Mes	Días de mayor actividad solar	Días de menor actividad solar
Agosto	12, 4	26, 15
Septiembre	17, 12	5, 22
Octubre	11, 10	25, 13
Noviembre	9, 10	28, 18
Diciembre	17, 9	26, 27

Para ilustrar el proceso de selección, tomamos como ejemplo el mes de octubre. Durante este mes, los días de alta actividad solar mostraron una intensidad considerable, lo que permitió una distinción clara entre periodos de mayor y menor impacto ionosférico.

3.1.1 Fuentes de datos y valores de referencia para el análisis de los parámetros relacionados con la actividad solar

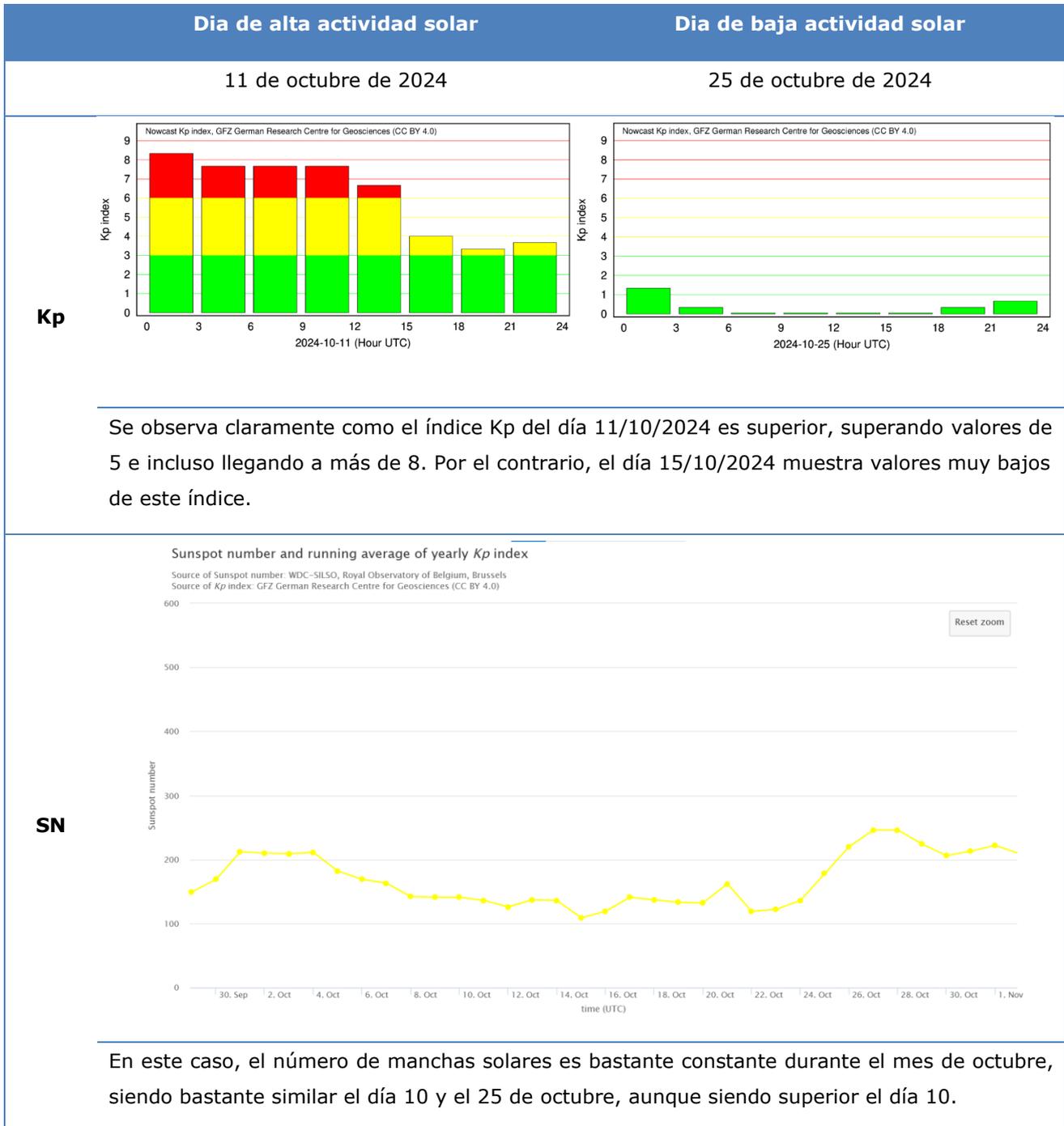
En esta sección se hace un resumen de los parámetros con las fuentes de donde se han obtenido y los valores de referencia para determinar la actividad solar. Para más información sobre los parámetros, ver la sección Parámetros utilizados para medir la actividad solar y geomagnética.

Los principales indicadores considerados para la selección de los días fueron:

1. **Índice Kp:** Se utilizó el índice Kp de las gráficas ofrecidas por el centro de investigación geodésica alemán, GFZ [25].
 - Alta actividad ionosférica: Días con índice Kp > 5
 - Baja actividad ionosférica: Días con índice Kp < 3.
2. **Manchas solares (SN):** Se analizaron datos ofrecidos por el mismo centro GFZ, relacionados a su vez con el índice Kp [26].
 - Alta actividad ionosférica: Días con SN > 100.
 - Baja actividad ionosférica: Días con SN < 50.
3. **Índice Dst:** Se consultó la tabla y gráficos del índice Dst en tiempo real, ofrecidos por el centro de datos mundiales de geomagnetismo de Kyoto [27].
 - Alta actividad ionosférica: Días con índice Dst < -100
 - Baja actividad ionosférica: Días con índice Dst > -100
4. **TEC (Contenido Total de Electrones):** Se accedió a datos de TEC en tiempo real a través de un repositorio con datos y gráficas del centro de investigación alemán DLR [28]. Cabe destacar que muchas de las gráficas de esta página no estaban disponibles así que se realizó un código en Matlab para obtener las gráficas ya que los datos sí que estaban disponibles en el repositorio.
 - Alta actividad ionosférica: Días con índice TEC > 50
 - Baja actividad ionosférica: Días con índice TEC < 10.
5. **Flujo F10.7:** Se obtuvo de los archivos txt descargados del centro de investigación geodésica alemán, GFZ [29].
 - Alta actividad ionosférica: Días con F10.7 > 200
 - Baja actividad ionosférica: Días con F10.7 < 80.
6. **Eventos de eyección de masa coronal (CME):** Se consultaron registros del catálogo de SOHO LASCO disponible [30]. En este catálogo se
 - Alta actividad ionosférica: velocidad lineal > 500 km/s, anchos angulares grandes (especialmente Halo CME) y altas energías cinéticas.
 - Baja actividad ionosférica: velocidades más bajas, anchos angulares reducidos, energías cinéticas más bajas.

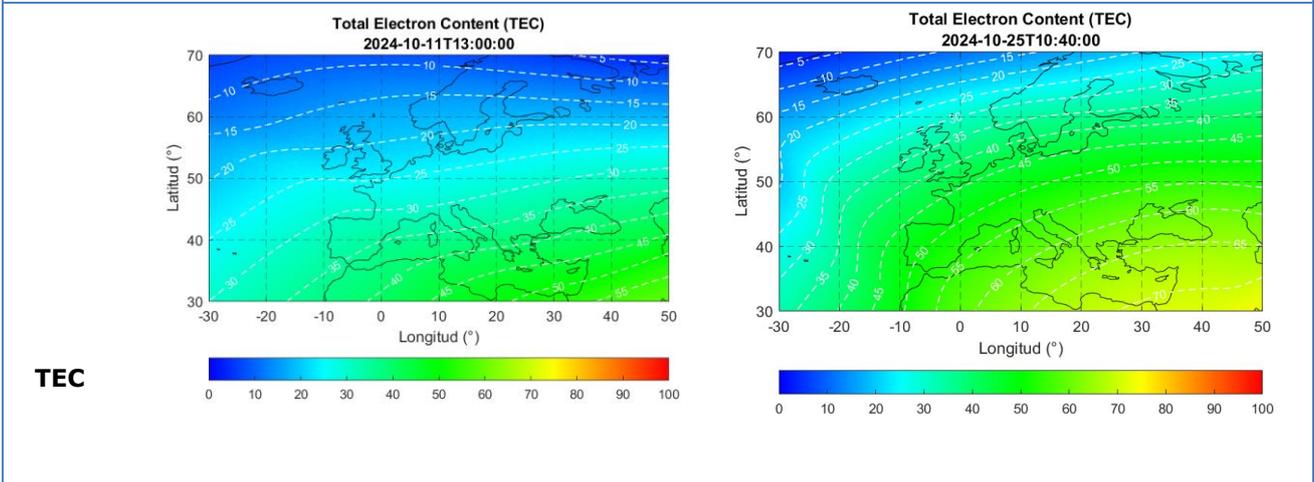
3.1.2 Ejemplo práctico: octubre 2024

Tabla 3-2. Ejemplo de análisis de la actividad solar





El día 11/10/2024 llega a alcanzar hasta -308 nT, siendo el día con el valor más intenso de tormenta solar. Por el contrario, el día 25/10/2024 tiene valores positivos durante todo el día, demostrando ser el día más tranquilo de actividad solar.



Tal y como se explica en la sección TEC (Total Electron Content), el TEC varía mucho a lo largo del día y según la latitud. No depende únicamente de la actividad solar por lo que no es un valor tan directo para relacionar el día de mayor y menor actividad solar. En estos dos días, parece de hecho indicar que el día 25/10/2024 hubo mayor actividad solar, pero el resto de los parámetros indica lo contrario. De todas formas, no haz una variación muy grande entre los valores TEC de ambos días.

	#YYY MM DD	F10.7obs	F10.7adj
F10.7	2024 10 11	213.9	213.1
	2024 10 25	209.3	206.8

Ambos días muestran una actividad fuerte si solo se analiza el índice F10.7 aunque para el día 10/10/2024 son ligeramente superiores que para el día 25/10/2024.

	First C2 Appearance	Central PA [deg]	Angular Width [deg]	Linear Speed [km/s]	Remarks	
CME	2024/10/11	04:24:06	285	13	733	Very Poor Event
	2024/10/11	05:02:04	108	71	131	Very Poor Event; Only C2
	2024/10/11	12:24:07	293	51	575	Poor Event
	2024/10/11	13:25:56	195	41	393	Poor Event
	2024/10/11	17:48:06	108	128	334	Poor Event; Partial Halo
	2024/10/25	03:12:05	155	32	421	Very Poor Event
	2024/10/25	07:12:05	87	11	464	Very Poor Event; Only C2
	2024/10/25	07:48:06	84	25	723	Poor Event
	2024/10/25	10:00:05	88	14	561	Very Poor Event
	2024/10/25	15:12:06	90	14	650	Poor Event
	2024/10/25	15:48:05	140	48	218	Poor Event; Only C2
	2024/10/25	19:36:05	175	17	505	Very Poor Event

En el caso de las eyecciones de masa coronarias, se puede observar que el evento con la mayor velocidad ocurrió el día 11/10/2024. Además, leyendo los comentarios, podemos leer que ese mismo día un evento de Halo parcial, por lo que se puede concluir que el día 11 hubo una mayor actividad solar.

Los resultados obtenidos en este análisis permiten concluir que los dos parámetros más visuales y confiables para determinar la actividad solar son el índice Dst y el índice Kp. En el caso específico del 11 y el 25 de octubre de 2024, estos dos indicadores reflejan claramente la diferencia de actividad solar entre ambos días. Mientras que el índice Kp supera valores de 8 el día 11 y el Dst alcanza hasta -308 nT, el día 25 muestra un Kp inferior a 3 y un Dst con valores positivos, confirmando la baja actividad solar.

Si bien otros parámetros como el número de manchas solares (SN), el TEC, el flujo F10.7 y las CME aportan información relevante, su interpretación puede generar ambigüedad. Por ejemplo, el TEC no reflejó diferencias significativas entre ambos días y el flujo F10.7 mostró valores elevados en ambos casos. Esto refuerza la idea de que, para evaluar la actividad solar de forma efectiva, el índice Kp y el Dst son los indicadores más determinantes y confiables.

3.2 Selección de estaciones EGNOS en Europa

Para evaluar el desempeño de EGNOS en diferentes condiciones de actividad ionosférica, se seleccionaron estaciones de referencia distribuidas por toda Europa. La selección de estas estaciones se basó en los siguientes criterios:

1. **Proximidad a aeropuertos:** Se priorizaron estaciones cercanas a aeropuertos con el fin de evaluar si los resultados obtenidos cumplen con las normativas de la Organización de Aviación Civil Internacional (OACI) para aproximaciones GNSS. Esto es especialmente relevante, ya que

EGNOS está diseñado para mejorar la precisión y confiabilidad del sistema GPS en aplicaciones de navegación aérea, lo que implica que su desempeño debe ser óptimo en entornos aeroportuarios.

2. **Distribución geográfica:** Se eligieron estaciones situadas en diferentes latitudes y longitudes para garantizar un análisis representativo del comportamiento de EGNOS en distintas regiones de Europa. La selección incluye estaciones en el sur (Canarias), centro (Roma y Sofía) y norte de Europa (Tromsø y Reikiavik), permitiendo así evaluar cómo afectan las variaciones en la actividad ionosférica en función de la ubicación geográfica.
3. **Optimización del tiempo de simulación:** Debido al alto costo computacional de las simulaciones con PEGASUS, se limitó el número de estaciones para garantizar un equilibrio entre representatividad y viabilidad en el procesamiento de datos. Cada simulación involucra múltiples etapas hasta la generación de resultados gráficos y numéricos, por lo que fue crucial encontrar un compromiso entre la cantidad de estaciones y la factibilidad de realizar un análisis detallado.

Las estaciones seleccionadas, junto con sus respectivas coordenadas y altitudes, fueron las siguientes:

Tabla 3-3. Coordenadas de las estaciones EGNOS seleccionadas

Código	Latitud (°)	Longitud (°)	Altitud (m)	Ubicación
ALBA	57.0964	9.8832	42.45	Aalborg, Dinamarca
CNRA	27.9454	-15.3794	50.92	Canarias, España
CRKA	51.8447	-8.4962	201.70	Cork, Irlanda
ROMA	41.8039	12.5838	172.70	Roma, Italia
RKKA	64.1293	-21.9315	83.76	Reikiavik, Islandia
SOFA	42.6849	23.4101	611.13	Sofía, Bulgaria
TROA	69.6632	18.9391	135.85	Tromsø, Noruega



Figura 3-1. Ubicación de las estaciones EGNOS seleccionadas

- **ALBA (Aalborg, Dinamarca):** Ubicada en el norte de Dinamarca, cerca del aeropuerto de Aalborg, esta estación permite evaluar el rendimiento de EGNOS en una región de latitud media-alta con condiciones atmosféricas frías y posibles perturbaciones ionosféricas en invierno.
- **CNRA (Canarias, España):** Esta estación, situada en una región subtropical, es clave para analizar el impacto de la actividad ionosférica en latitudes más bajas. Además, su proximidad al océano Atlántico permite evaluar el rendimiento de EGNOS en zonas donde la cantidad de estaciones terrestres de referencia es menor.
- **CRKA (Cork, Irlanda):** Esta estación se encuentra en una latitud media en el noroeste de Europa. Su elección se debe a la posibilidad de evaluar el rendimiento de EGNOS en una región con clima oceánico, lo que puede afectar la propagación de las señales GNSS.
- **ROMA (Roma, Italia):** Ubicada en el centro del continente, la estación de Roma permite analizar el comportamiento de EGNOS en una latitud media dentro de una zona con alta actividad aeronáutica. Su altitud moderada y ubicación en un entorno urbano son aspectos clave para su selección.

- **RKKA (Reikiavik, Islandia):** Al ser la estación más septentrional de la muestra, permite estudiar el desempeño de EGNOS en latitudes altas, donde la actividad ionosférica es más intensa debido a la proximidad con la aurora boreal. Esto es crucial, ya que las perturbaciones ionosféricas pueden tener un impacto significativo en la navegación aérea en estas regiones.
- **SOFA (Sofía, Bulgaria):** Esta estación, situada en Europa del Este a una altitud considerable, permite evaluar cómo afecta la topografía montañosa a las prestaciones de EGNOS. Es relevante analizar si existen diferencias en el desempeño del sistema en zonas con variaciones de altitud significativas.
- **TROA (Tromsø, Noruega):** Siendo la estación más cercana al círculo polar ártico, Tromsø es una de las localizaciones más importantes para analizar el impacto de la actividad geomagnética sobre EGNOS. Esta estación permite evaluar el desempeño del sistema en condiciones extremas de latitud, donde la ionosfera puede presentar comportamientos altamente dinámicos.

La combinación de estas estaciones garantiza que el análisis del desempeño de EGNOS cubra una amplia variedad de condiciones geográficas y atmosféricas en Europa. Se han considerado factores como la latitud, la proximidad a aeropuertos clave, la distribución geográfica y la viabilidad de simulación. Con estos criterios, se busca proporcionar una visión detallada del rendimiento de EGNOS en diferentes entornos, asegurando la representatividad de los resultados obtenidos en las simulaciones realizadas con PEGASUS.

3.3 Inputs del estudio

Para llevar a cabo las simulaciones con PEGASUS y el posterior análisis del desempeño de EGNOS, es necesario contar con diversos archivos de entrada que proporcionan la información clave sobre la señal GNSS y los parámetros ionosféricos. En esta sección se detallan los principales ficheros empleados como inputs, así como el procesamiento previo necesario antes de su uso en las simulaciones.

- **Mensajes SBAS:** Contienen las correcciones de EGNOS y deben ser convertidos al formato adecuado.
- **Ficheros RINEX de navegación y observación:** Proveen efemérides y observaciones satelitales, siendo necesario filtrarlos y adaptarlos para su uso en PEGASUS.
- **Reportes mensuales de rendimiento de EGNOS:** Facilitan la comparación de resultados con datos oficiales del sistema.

3.3.1 Mensajes SBAS de EGNOS

Para obtener los mensajes SBAS de EGNOS es necesario registrarse en el servicio EDAS (EGNOS Data Access Service) y solicitar acceso al EDAS FTP Service, el cual proporciona datos históricos de EGNOS. El acceso a este servicio no es público y requiere una solicitud formal, en la que es necesario justificar el uso de los datos. Una vez aprobada la solicitud, se recibe un usuario y contraseña para acceder a los datos mediante un cliente FTP estándar, como FileZilla.

El EDAS FTP Service permite a los usuarios acceder a datos SBAS históricos, organizados por fechas y formatos específicos. La estructura de directorios y la nomenclatura de archivos se encuentran detalladas en el EDAS FTP-User Information Package, disponible en la sección de descargas de EDAS.

Estos mensajes SBAS contienen las correcciones y parámetros de ionosfera transmitidos por EGNOS y son comunes para todas las estaciones EGNOS. Por lo tanto, se descarga un archivo por cada día de la muestra seleccionada. Para más detalles sobre el contenido y estructura de estos mensajes, se puede consultar la sección Mensajes SBAS y correcciones ionosféricas.

3.3.2 Archivos RINEX de navegación y observación

Los archivos RINEX (Receiver Independent Exchange Format) de navegación y observación son fundamentales para el análisis del desempeño de EGNOS, ya que contienen información detallada sobre las efemérides satelitales y las observaciones registradas en cada estación GNSS. Para más información sobre su formato y contenido, se puede consultar la sección RINEX de navegación y observación.

Los archivos RINEX se dividen en dos categorías principales:

- RINEX de navegación: Son archivos diarios que contienen los datos de efemérides, mensajes de navegación y otros parámetros orbitales de los satélites GNSS.
- RINEX de observación: Pueden estar disponibles en versiones diarias o en segmentos de 15 minutos. Para este estudio, se han seleccionado los archivos de 15 minutos, ya que contienen mayor cantidad de datos y permiten obtener gráficos más completos y representativos.

Cada estación GNSS genera un archivo RINEX de navegación por día y 96 archivos de observación por día (correspondientes a los segmentos de 15 minutos). Esto significa que, para cada día de estudio y estación seleccionada, es necesario descargar 1 archivo de navegación y 96 archivos de observación.

3.3.2.1. Procesamiento previo de los archivos RINEX

Antes de utilizar estos archivos en PEGASUS, es necesario llevar a cabo un procesamiento en varias etapas debido a la estructura y formato de los datos originales. Dado el elevado número de archivos a procesar, este procedimiento se ha automatizado mediante un script en MATLAB desarrollado

específicamente para este trabajo de fin de máster. La automatización evita errores manuales y optimiza el tiempo de preparación de los datos.

El script realiza la conversión, organización y preparación de los archivos de entrada, asegurando que estén en el formato adecuado para su análisis en PEGASUS. Los principales pasos de este preprocesamiento son los siguientes:

1. Descompresión de archivos RINEX

Los archivos RINEX descargados desde las estaciones GNSS suelen estar comprimidos en formato “.Z”. Para hacerlos accesibles al procesamiento, primero se descomprimen, obteniendo archivos en formato de texto estándar.

2. Conversión de archivos RINEX en formato Hatanaka

Los ficheros de observación originales se encuentran en formato CRX (Hatanaka), que reduce el tamaño de los datos sin pérdida de información. Para su uso en PEGASUS, es necesario convertirlos al formato estándar RINEX utilizando la herramienta CRX2RNX, parte del software Hatanaka de distribución libre. Esta conversión garantiza la correcta interpretación de los datos sin alterar su integridad.

3. Concatenación de archivos RINEX de observación

Las estaciones GNSS generan archivos de observación en intervalos de 15 minutos, lo que resulta en múltiples ficheros diarios. PEGASUS requiere que la información de un mismo día esté consolidada en un único archivo por estación. Para ello, los ficheros se concatenan manteniendo solo la cabecera del primer archivo y actualizando la línea de la última época con la cabecera del último fichero.

4. Eliminación de archivos individuales

Una vez completada la concatenación, los archivos RINEX individuales dejan de ser necesarios y se eliminan automáticamente. Esto optimiza el espacio de almacenamiento y facilita la gestión de archivos en las carpetas de trabajo.

5. Estandarización de nombres de archivos

Para que PEGASUS pueda identificar y procesar correctamente los archivos, estos se renombran siguiendo una estructura uniforme, con el formato de los ficheros siguiendo el siguiente patrón:

XXXXggg0.YY0

Donde:

- XXXX representa el código de la estación GNSS.
- ggg es el número de día GPS.
- YY corresponde a los últimos dos dígitos del año.
- 0 indica que es un archivo de observación.

Este formato permite que PEGASUS asocie automáticamente los archivos con la estación y el día correspondiente en la simulación.

6. Organización de archivos por carpetas

Para facilitar la gestión y el acceso a los archivos procesados, se ha establecido una estructura de organización basada en el número de día GPS y el año. Los ficheros se almacenan en directorios con la siguiente jerarquía:

Carpeta principal: ggg_YY

- Subcarpetas por estación GNSS: Cada estación cuenta con una carpeta específica dentro del directorio correspondiente al día GPS procesado.

Archivos almacenados en cada subcarpeta:

- XXXXggg0.YYO → Archivo de observación procesado.
- XXXXggg0.YYN → Archivo de navegación descomprimido.
- XXXXggg0.YYB → Mensaje SBAS, renombrado con la misma convención.

Donde:

- XXXX representa el código de la estación GNSS.
- ggg es el número de día GPS.
- YY corresponde a los últimos dos dígitos del año.
- Las extensiones .O, .N y .B indican, respectivamente, los archivos de observación, navegación y mensajes SBAS.

Este sistema de organización garantiza una clasificación estructurada de los archivos, permitiendo su identificación rápida y asegurando su correcta integración en el flujo de trabajo de PEGASUS.

3.3.3 Reportes de rendimiento de EGNOS

Los reportes mensuales de prestaciones de EGNOS constituyen una referencia fundamental para evaluar las prestaciones del sistema y su cumplimiento con los estándares definidos en los Service Definition Documents (SDDs) (documentos de definición de servicio). Estos informes proporcionan una visión detallada del rendimiento del servicio durante cada mes, incluyendo métricas clave como disponibilidad, continuidad, precisión e integridad en distintos entornos y estaciones de monitoreo en Europa.

En el contexto del presente estudio, estos reportes han sido utilizados en una primera fase para identificar las gráficas y métricas necesarias en el análisis del desempeño de EGNOS. A partir de estas referencias, se ha establecido un criterio de selección de parámetros a replicar en el software PEGASUS, utilizando datos obtenidos a través de EGNOS EDAS FTP. De esta manera, se ha buscado garantizar que los resultados obtenidos con PEGASUS sean comparables con los reportes oficiales de EGNOS.

El análisis detallado por estación y día ha permitido evaluar el rendimiento del sistema en distintos entornos y períodos, facilitando la identificación de posibles degradaciones del servicio asociadas a

eventos de alta actividad ionosférica. Además, los datos de estos informes han servido como referencia para comparar el desempeño de EGNOS en relación con los requisitos establecidos por la Organización de Aviación Civil Internacional (OACI) para sistemas GNSS en entornos aeroportuarios. Específicamente, se han considerado métricas como la disponibilidad y continuidad del servicio APV-I y LPV200, aspectos fundamentales en la navegación basada en EGNOS dentro del sector aeronáutico.

Asimismo, los reportes incluyen información sobre la disponibilidad y precisión del EGNOS Data Access Service (EDAS), lo que ha permitido contrastar el rendimiento de los datos obtenidos a través de EDAS FTP con los valores reportados en el informe mensual. Esto ha sido clave para validar la fiabilidad de los datos utilizados en el presente estudio y para detectar posibles discrepancias que podrían afectar el análisis del rendimiento de EGNOS en escenarios específicos.

3.4 Simulación con el software PEGASUS

PEGASUS (Performance Evaluation of GNSS User Systems) es un conjunto de herramientas desarrollado por EUROCONTROL para analizar datos GNSS recopilados de distintos sistemas SBAS y GBAS. Implementa algoritmos especificados en los documentos MOPS (Minimum Operational Performance Standards) y está diseñado para ayudar a los proveedores de servicios de navegación aérea y usuarios a evaluar el rendimiento de las señales de navegación por satélite y sus sistemas de aumentación.

PEGASUS permite calcular la posición simulando receptores compatibles con los estándares MOPS y determinar atributos clave de la aumentación GNSS, tales como:

- Precisión.
- Integridad.
- Cálculo de errores en trayectorias.
- Predicción de continuidad y disponibilidad.
- Simulación de algoritmos de procesamiento de estaciones GBAS en tierra.

Los resultados obtenidos con PEGASUS son útiles para la validación de estándares GNSS de organismos como la OACI, RTCA y EUROCAE, así como para campañas nacionales de verificación del desempeño GNSS y la acumulación rápida de datos estadísticos relevantes. Además, permite la verificación independiente del desempeño de sistemas de aumentación GNSS.

El proceso de análisis con PEGASUS consta de tres etapas claramente diferenciadas:

- Módulo Convertor: En esta fase, los datos GNSS en formato RINEX u otros formatos compatibles se convierten a un formato de entrada adecuado para PEGASUS.
- Módulo GNSS Solution: Se procesan los datos convertidos para calcular la solución de navegación, evaluando parámetros clave como precisión, integridad, disponibilidad y continuidad.

- Módulo M-File Runner: Se generan las gráficas y resultados finales, permitiendo la visualización y análisis del desempeño del sistema GNSS en función de los criterios establecidos.

En las siguientes secciones se explica el paso a paso detallado para obtener las gráficas necesarias para el análisis de los resultados.

3.4.1 Convertor

El módulo Convertor es el primer paso dentro del flujo de trabajo con PEGASUS y tiene la función de transformar archivos en formato RINEX a ASCII, asegurando que los módulos posteriores puedan procesar correctamente los datos. Solo es necesario ejecutar la conversión de los archivos de observación (extensión “.O”), mientras que los archivos de navegación y mensajes SBAS ya están en un formato adecuado y con el mismo formato de nombre, solo diferenciándose en las extensiones, tal y como se ha explicado en la sección Procesamiento previo de los archivos RINEX.

A continuación, se muestra una imagen de la interfaz y se explican uno a uno los parámetros a modificar.

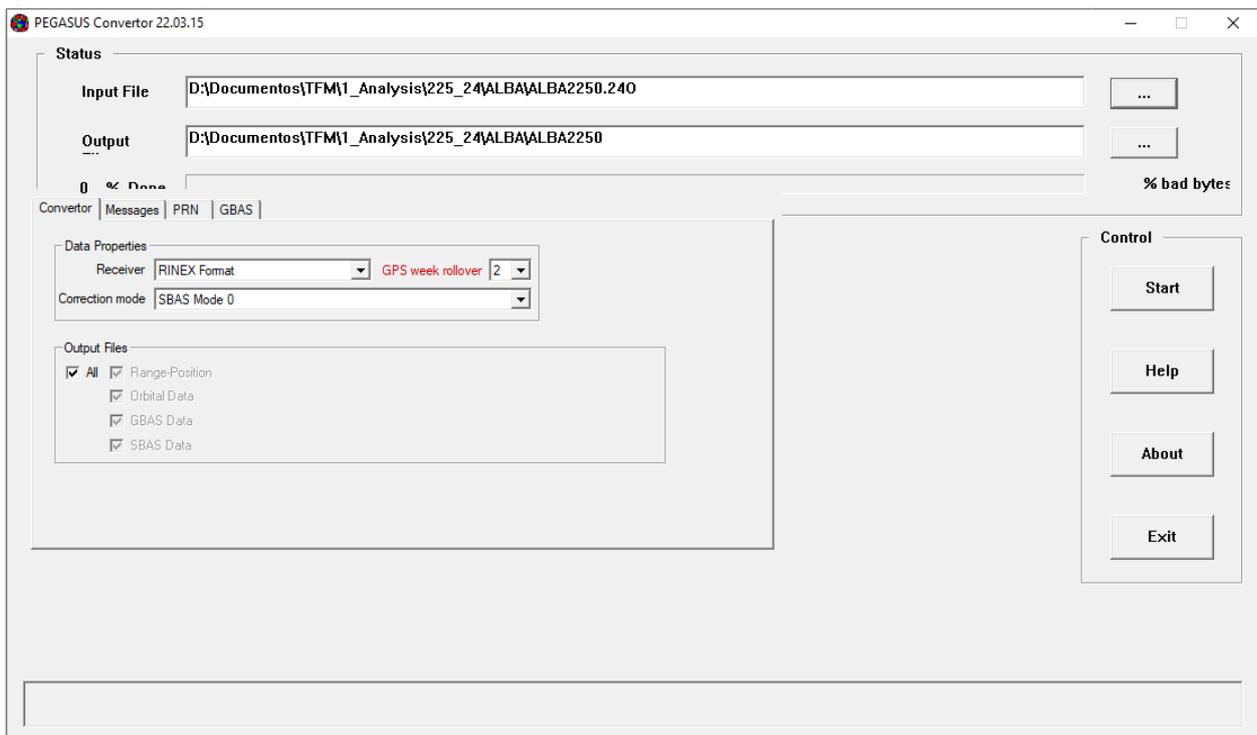


Figura 3-2. Interfaz del módulo Convertor

- Input File: Ruta al fichero rinex de observación.
- Receiver: Se seleccionó *RINEX Format* para garantizar la compatibilidad con los archivos de entrada.

- Correction mode: Se configuró en *SBAS Mode 0*, evitando que los mensajes de tipo 0 sean interpretados incorrectamente como correcciones rápidas.
- GPS Week Rollover: Se estableció en 2, asegurando la correcta interpretación del tiempo en los datos GPS.

El GPS Week Rollover es un fenómeno que ocurre debido a la forma en que el sistema GPS almacena el número de semanas transcurridas desde su inicio (6 de enero de 1980). Este contador utiliza solo 10 bits, lo que significa que puede contar hasta 1023 semanas (aproximadamente 19,7 años). Cuando alcanza el valor 1023, en la siguiente semana vuelve a 0, lo que puede causar errores en la interpretación de la fecha si no se tiene en cuenta correctamente.

Hasta la fecha, ha habido dos eventos de rollover en GPS. El primer rollover ocurrió el 21 de agosto de 1999 y el segundo sucedió el 6 de abril de 2019. Dado que actualmente nos encontramos en el segundo rollover, se debe establecer el parámetro GPS Week Rollover = 2 en Convertor.

Al completar la conversión en Convertor, se generan múltiples archivos que serán utilizados en las siguientes fases del análisis. Entre ellos:

- Archivos SBAS con extensiones “.s”, “.sfc” y “.ssc”.
- Archivos de efemérides GPS (ALBA2550_BRCD02550.24N).
- Archivos de efemérides SBAS (ALBA2550_BRCD02550.24H).
- Archivo “.smt” con información de los mensajes SBAS.
- Archivo de almanaque SBAS (ALBA2550_GEO2327.alm).
- Archivo de registro “.cnv.log”, con información sobre la conversión.
- Archivo “.rng”, que contiene los datos de posicionamiento.
- Archivo “.mif”, con valores de parámetros procesados.

Para más información sobre este módulo, ver el manual de usuario de este módulo, proporcionado junto con el resto del software PEGASUS al descargarlo [31].

3.4.2 GNSS Solution

El módulo GNSS Solution es el segundo componente dentro del flujo de procesamiento de PEGASUS y se utiliza para el análisis postproceso de los datos GNSS. Su función principal es calcular la posición del receptor a partir de los archivos generados en el módulo anterior (Convertor), siguiendo los estándares MOPS para señales GPS, SBAS y GBAS.

El resultado obtenido es un conjunto de valores numéricos que describen el rendimiento del sistema en términos de precisión, integridad, disponibilidad y continuidad. Estos datos serán posteriormente utilizados en el siguiente módulo de PEGASUS para su representación gráfica, facilitando así su análisis y validación.

Inicialmente, el procedimiento de ejecución de este módulo se realizaba de manera manual, pero debido a la gran cantidad de simulaciones requeridas en este estudio, se decidió implementar un método automatizado.

Se llevaron a cabo un total de 140 simulaciones, correspondientes a 7 estaciones GNSS, analizando para el periodo de agosto a diciembre de 2024 los dos días de mayor y menor actividad solar.

La automatización no fue un proceso sencillo, ya que, a pesar de contar con el manual de usuario [32], se encontraron inconsistencias y lagunas en la documentación, lo que dificultó la configuración correcta del software. Fueron necesarias numerosas pruebas y ajustes antes de lograr un proceso funcional.

Cada simulación tenía un tiempo promedio de ejecución de 12 minutos, lo que supuso un alto coste computacional. Sin embargo, la automatización permitió reducir significativamente la intervención manual y asegurar una ejecución eficiente de todas las pruebas requeridas.

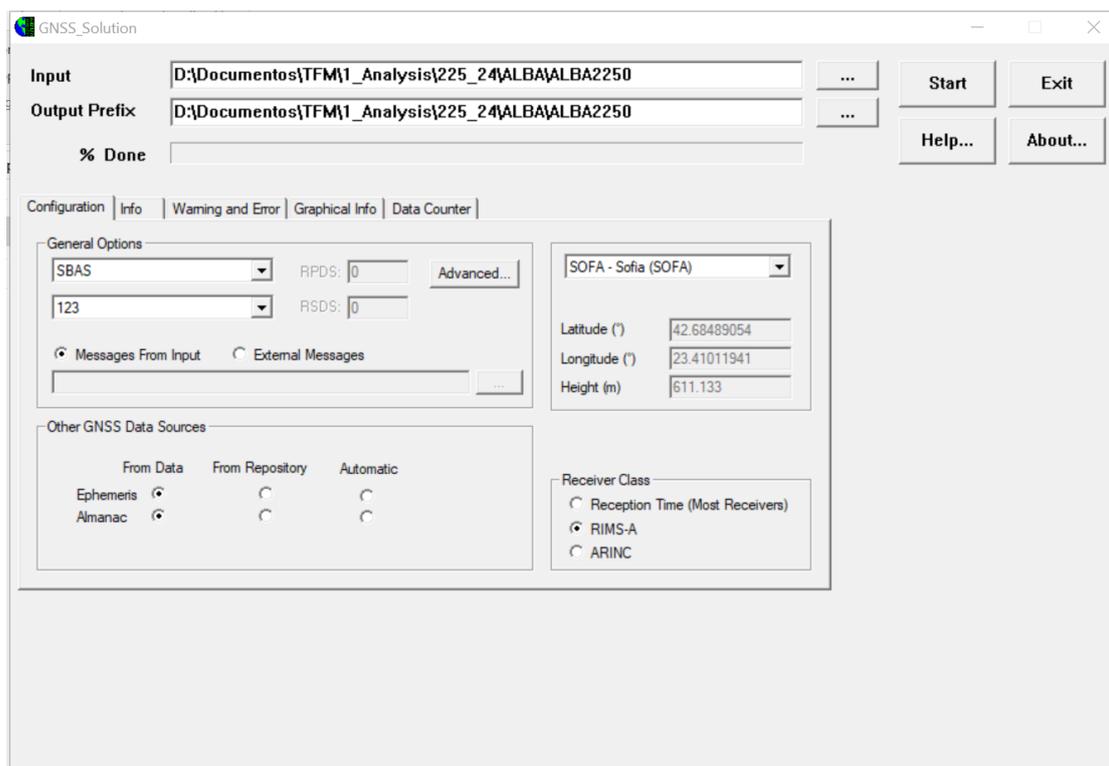


Figura 3-2. Interfaz del módulo GNSS Solution

Para ejecutar una simulación en GNSS Solution de forma manual se necesita la siguiente configuración:

María Cerrada Muñoz

Trabajo Fin de Máster – Evaluación del desempeño de EGNOS en condiciones de alta actividad solar

- Input: El input de este segundo paso es uno de los outputs del primer paso, obtenido por el módulo Convertor. Este es el fichero con terminación "_cnv.rng", por ejemplo ALBA2550_CNV.RNG
- General options: SBAS (ya que los datos analizados provienen de EGNOS) y PRN 123. En este análisis se usó PRN 123, aunque también podría haberse utilizado PRN 136 sin un impacto significativo en los resultados.
- Estación. Para una mayor automatización se introdujeron las estaciones seleccionadas en la lista de estaciones de referencia para que la latitud, longitud y altura se definieran automáticamente al dar el nombre de la estación.
- Messages From Input
- Other GNSS Data Sources. Se marcan Ephemeris y Almanac "From Data", lo que permite que el software busque automáticamente los archivos de efemérides y almanaques dentro del directorio del proyecto.
- Receiver Class: Es importante marcar RIMS-A ya que las estaciones de referencia son este tipo de receptor.
- Sin embargo, en opciones avanzadas se debe marcar "Ignore Almanac", ya que los archivos RINEX utilizados no contienen el almanaque necesario. Aunque en este módulo el almanaque no es crítico, será relevante en la última fase del procesamiento.

Una vez configurados los parámetros, se inicia la simulación. Durante la ejecución, en la pestaña Graphical Info, se pueden visualizar gráficas con la evolución de los siguientes parámetros:

- VPL (Vertical Protection Level)
- HPL (Horizontal Protection Level)
- VPE (Vertical Position Error)
- HPE (Horizontal Position Error)

Además, se muestran indicadores visuales sobre la capacidad del sistema para soportar distintos tipos de aproximaciones GNSS, cambiando de color rojo (no soportado) a verde (cumple requisitos).

Al finalizar la ejecución, se generan los siguientes archivos en la carpeta del software:

- ALBA2550_SOL.POS: Resultados de posicionamiento.
- ALBA2550_SOL.MIF: Resultados del procesamiento.
- ALBA2550_SOL.LOG: Registro detallado de la simulación.

Estos archivos contienen toda la información generada en la simulación y serán utilizados en el análisis final de prestaciones GNSS.

3.4.3 M-File Runner

El M-File Runner es el último módulo de PEGASUS utilizado en este análisis. Su función principal es automatizar la evaluación de la performance GNSS, generando gráficos y análisis estadísticos de los datos obtenidos en los módulos previos. A diferencia de los módulos anteriores, que procesaban y calculaban información numérica, este módulo se enfoca en la visualización gráfica de los resultados, facilitando la interpretación y la obtención de conclusiones.

Al igual que en el módulo anterior, se optó por automatizar la ejecución para hacer viable el procesamiento de la gran cantidad de simulaciones requeridas. Sin embargo, la documentación del software presentaba numerosas imprecisiones, lo que obligó a realizar ingeniería inversa a partir de los errores y outputs hasta conseguir un script de automatización funcional.

A pesar de contar con el manual de usuario[33], la automatización no fue sencilla debido a múltiples problemas en la ejecución, falta de información clara sobre los parámetros de entrada y diferencias entre los archivos generados y los requeridos por el módulo. Se realizó una exhaustiva revisión de los errores y salidas del software hasta lograr un script automatizado que permitiera procesar todas las simulaciones de manera eficiente.

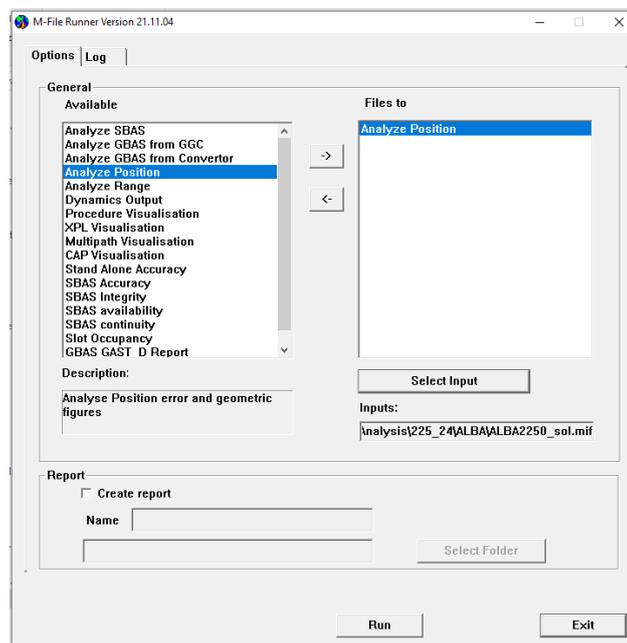


Figura 3-4. Interfaz del módulo M-File Runner

Para ejecutar correctamente M-File Runner, se siguen los siguientes pasos:

1. Selección de archivos de entrada:

ALBA2550_SOL.MIF, obtenido en el anterior módulo GNSS Solution.

2. Selección de funcionalidades

M-File Runner dispone de diversas herramientas de análisis. En este estudio, se emplearon cuatro módulos principales:

Analyze Position → Permite visualizar la distribución de errores de posición.

SBAS Accuracy → Evalúa la precisión del sistema SBAS.

SBAS Integrity → Analiza los niveles de integridad.

Inicialmente, se intentó utilizar también los módulos SBAS Availability y SBAS Continuity, pero generaban datos erróneos o vacíos, por lo que se descartaron en el análisis.

3. Generación de gráficos y análisis estadístico

Una vez configurados los parámetros, el módulo ejecuta el análisis y genera una serie de gráficos y reportes que permiten evaluar el rendimiento de la solución GNSS. Entre las visualizaciones más relevantes se incluyen:

- Histogramas de errores de posición para los servicios LPV200 y APV1:
 - HPE (Horizontal Position Error)
 - VPE (Vertical Position Error)
 - HPL (Horizontal Protection Level)
 - VPL (Vertical Protection Level)
 - HSI (Horizontal Safety Index)
 - VSI (Vertical Safety Index)
- Horizontal deviation from reference SBAS
- Diagramas de Stanford Horizontal y Vertical
- Curvas de comparación de errores y niveles de protección
 - HPE, HPL y número de satélites visibles (NSV)
 - VPE, VPL y NSV
- Curvas de distribución acumulada (CDF Position Domain)

4 Análisis de Resultados

En las siguientes secciones se presentan los datos y gráficas obtenidas durante el estudio con el software PEGASUS para las prestaciones de los sistemas SBAS. Se analizan por separado la precisión, integridad, disponibilidad y continuidad. Debido a la gran cantidad de datos, en muchos casos se muestran estos datos en forma de tabla siguiendo en todo el mismo formato. Las primeras diez líneas de la tabla son los datos de gran actividad solar, señalados con sombra roja. Las últimas diez líneas de la tabla corresponden con los días de baja actividad solar, señalados con verde.

4.1 Precisión

En primer lugar, se presentan los resultados relacionados con la precisión. Para evaluar la precisión del sistema SBAS, se han considerado diversos parámetros que reflejan el error en la determinación de la posición del usuario. Entre ellos, los más relevantes son el HSNE (Horizontal Safety Net Error) y el VSNE (Vertical Safety Net Error), ya que permiten cuantificar la desviación de la posición estimada respecto a la real en los planos horizontal y vertical, respectivamente.

La precisión en sistemas de navegación basados en SBAS se especifica generalmente mediante percentiles, siendo el más común el percentil 95% de la distribución de errores. En el caso de las aproximaciones LPV200, los límites de precisión son estrictos, con un umbral de 16 metros para el error horizontal (HSNE) y entre 4 y 6 metros para el error vertical (VSNE). Por otro lado, los procedimientos APV tradicionales presentan requisitos menos exigentes en cuanto a precisión.

Dado que las aproximaciones LPV-200 requieren un nivel de desempeño más alto, este estudio se centrará exclusivamente en analizar el cumplimiento de estos valores. Esto permitirá una evaluación más precisa de la capacidad del sistema SBAS para proporcionar un servicio de navegación de alta precisión, asegurando que los errores en la posición se mantienen dentro de los márgenes aceptables para operaciones críticas como el aterrizaje asistido.

Tabla 4-1. Resultados de precisión horizontal

HSNE	ALBA	CNRA	CRKA	RKKA	ROMA	SOFA	TROA
04/08	0.433607	0.957227	0.616519	0.499503	1.05111	0.890637	0.423974
12/08	0.525503	0.978416	0.765367	0.507925	1.14347	0.705222	0.926664
17/09	0.448147	1.50102	0.407746	0.510134	1.28824	0.792221	0.448595
12/09	0.696447	0.854032	0.809076	0.557096	1.41046	0.739599	0.586062
11/10	0.452937	0.841613	0.38705	0.6086	0.978536	0.553785	0.569996
10/10	0.533628	NaN	NaN	0.549575	NaN	0.837444	0.597093
09/11	0.977127	0.913874	0.675735	NaN	1.05673	0.653809	0.728334
10/11	0.507124	0.895086	0.630991	0.573761	0.993395	0.632832	0.718936
17/12	0.410363	0.819934	0.49026	0.581453	0.852551	0.563919	0.62394
09/12	0.5221	1.09308	0.632587	0.738503	0.983437	0.582886	0.548419
26/08	0.385767	NaN	0.43525	0.582408	1.21483	0.653477	0.452059
15/08	0.354098	1.17775	0.464	0.473512	1.18611	0.599291	0.742423
05/09	0.459641	1.00494	0.478554	0.641433	1.19002	0.639246	0.517933
22/09	0.319328	1.24382	0.460322	0.499934	1.09178	0.538051	0.519825
25/10	0.527072	1.18881	0.556608	0.571199	1.0511	0.615569	0.562624
13/10	0.295766	1.12437	0.438872	0.424335	1.17992	0.654452	0.523303
28/11	0.460738	1.07573	0.512274	0.554847	1.08799	0.83719	0.58162
18/11	0.363594	1.2087	0.520661	0.442777	1.02154	0.602154	0.485352
26/12	0.375651	1.21572	0.421102	0.36057	0.990111	0.633484	0.398039
27/12	0.385539	1.2715	0.491862	0.489636	1.00426	0.598226	0.566319

Tabla 4-2. Resultados de precisión vertical

VSNE	ALBA	CNRA	CRKA	RKKA	ROMA	SOFA	TROA
04/08	0.642456	1.14075	0.490651	0.977117	0.540448	0.932473	0.926463
12/08	1.07725	1.5457	0.80304	0.900868	0.591039	0.790903	1.88219
17/09	0.677206	1.07936	0.565612	0.859108	0.579566	0.910897	0.919001
12/09	1.17168	1.80373	0.869093	1.21025	1.21721	1.09508	1.22648
11/10	0.690178	0.917809	0.427995	1.06354	0.542347	0.801838	0.929119
10/10	0.82886	NaN	NaN	0.794933	NaN	0.933106	1.01533
09/11	1.38177	1.61533	0.799256	NaN	0.670644	0.876478	1.48892
10/11	0.842126	1.20468	0.733744	0.985854	0.526343	0.715496	1.5344
17/12	0.806759	0.75934	0.860883	1.06823	0.530137	0.617831	1.05668
09/12	0.962262	0.819504	0.845029	1.29454	0.71462	0.729355	1.50438
26/08	0.526758	NaN	0.429287	0.313346	0.665502	0.709788	0.886026
15/08	0.649883	1.22768	0.615967	0.733173	0.533782	0.781792	1.25184
05/09	0.602963	1.84137	0.512408	0.75233	0.758091	0.92212	0.880059
22/09	0.464226	0.954564	0.567486	0.867109	0.522189	0.771273	1.19539
25/10	0.826784	1.31052	0.679823	0.986033	0.471102	0.738154	0.83031
13/10	0.505432	0.889866	0.479346	0.798229	0.53535	0.743196	0.838044
28/11	0.793981	0.882562	0.788233	0.967584	0.633319	1.08753	1.03424
18/11	0.588853	0.847592	0.768138	0.72924	0.48166	0.59342	0.865259
26/12	0.983399	0.83154	0.838128	0.718299	0.516913	0.579244	0.951299
27/12	1.08388	0.843813	0.834191	0.845094	0.476813	0.619942	0.992402

A partir del análisis de los resultados de precisión horizontal (HSNE) y precisión vertical (VSNE) en las siete estaciones y a lo largo de los 20 días de observación, se pueden extraer las siguientes conclusiones clave en relación con los requisitos de LPV-200:

A partir del análisis de los valores de precisión horizontal (HPE) y vertical (VPE) obtenidos en diferentes estaciones de referencia geográfica durante varios días del año 2024, se puede concluir que todos los datos observados cumplen holgadamente con los requisitos mínimos establecidos para aproximaciones LPV200. En particular, ninguno de los valores registrados supera los umbrales críticos operacionales, que en condiciones normales de operación se sitúan por debajo de 1,5 metros para HPE y 2 metros para VPE, asegurando un margen suficiente de precisión y seguridad.

Las estaciones ALBA (Aalborg, Dinamarca) y CRKA (Cork, Irlanda) presentan los mejores resultados globales, con valores promedio de HPE y VPE claramente por debajo de 0,6 y 0,8 metros respectivamente, y con una variabilidad reducida a lo largo de las fechas analizadas. Estas estaciones se posicionan como candidatas óptimas para la validación y supervisión de integridad en escenarios LPV200.

Por otro lado, las estaciones CNRA (Canarias, España) y TROA (Tromsø, Noruega) muestran los valores más elevados, alcanzando picos de VPE cercanos a 1,88 metros en días puntuales. Aunque estos valores siguen siendo adecuados para la operación de aproximaciones LPV200, podrían indicar una mayor sensibilidad a fenómenos como la variabilidad ionosférica, particularmente relevante en latitudes elevadas o zonas geográficas afectadas por eventos solares.

Cabe destacar que algunas fechas específicas —como el 12 de septiembre, el 9 de noviembre y el 12 de agosto— muestran incrementos notables en los valores de VPE en varias estaciones. Esto sugiere la conveniencia de realizar un análisis más detallado que relacione estos aumentos con episodios de alta actividad solar o perturbaciones geomagnéticas, con el fin de evaluar su posible impacto sobre la precisión y disponibilidad del sistema SBAS en contextos reales.

4.2 Integridad

La integridad es un parámetro fundamental en la evaluación del desempeño de un sistema SBAS, ya que mide su capacidad para detectar y alertar sobre posibles errores en la determinación de la posición en un tiempo adecuado. Para analizar esta característica en el contexto de LPV-200, se examinan cuatro tipos de gráficos clave:

- Histogramas HSI (Horizontal Safety Index) e Histogramas VSI (Vertical Safety Index), que permiten evaluar la distribución de los errores de posición en relación con los niveles de protección.
- Diagramas de Stanford H (Horizontal) y Diagramas de Stanford V (Vertical), que muestran la relación entre los errores de posición y los límites de protección en cada eje, permitiendo visualizar cuándo el sistema opera dentro de márgenes seguros.

El Índice de Seguridad (SI) se calcula como la relación entre el error de posición y el nivel de protección (PL). Para que el sistema sea seguro, este índice debe ser menor que 1 en todo momento. En sistemas SBAS como EGNOS, este índice suele estar por debajo de 0.5, lo que indica un alto margen de seguridad y confiabilidad.

4.2.1 Ejemplo de gráficas de integridad

A continuación, se muestra un ejemplo de estas gráficas, lo que permite apreciar la similitud entre los resultados simulados y los datos oficiales. Posteriormente, en la sección de conclusiones, se ampliará la discusión sobre esta comparación, evitando así la sobrecarga visual de incluir todas las gráficas de los 20 días de análisis y las 7 estaciones.

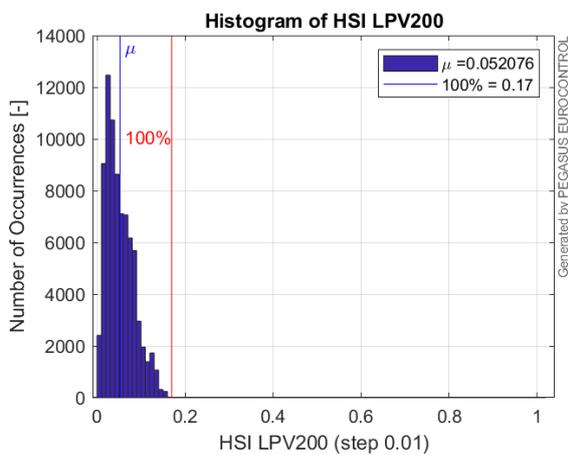


Figura 4-1. Ejemplo de grafica HSI

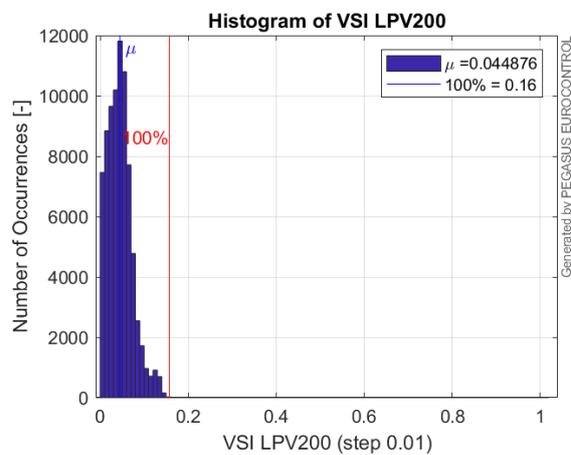


Figura 4-2. Ejemplo de grafica VSI

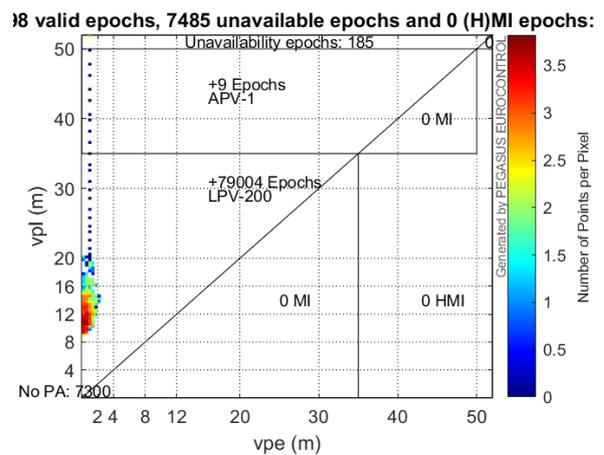
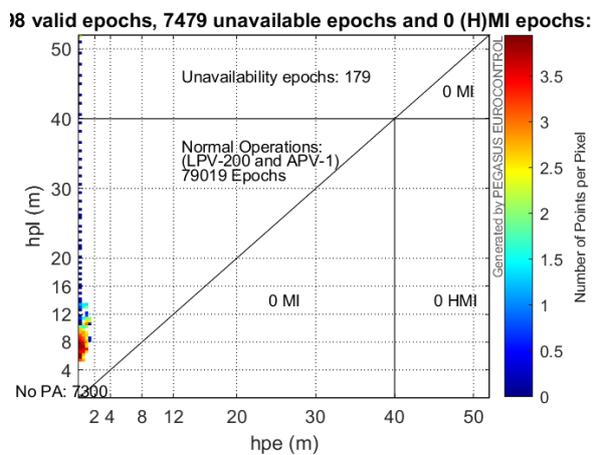


Figura 4-3. Ejemplo de diagrama horizontal de Stanford

Figura 4-4. Ejemplo de diagrama vertical de Stanford

Para validar la confiabilidad de la simulación realizada con PEGASUS, se comparan los resultados obtenidos con los diagramas oficiales proporcionados en la página de EGNOS. Esto permite verificar que los datos generados a partir del procesamiento de los mensajes SBAS son consistentes con los datos reales proporcionados por el sistema.

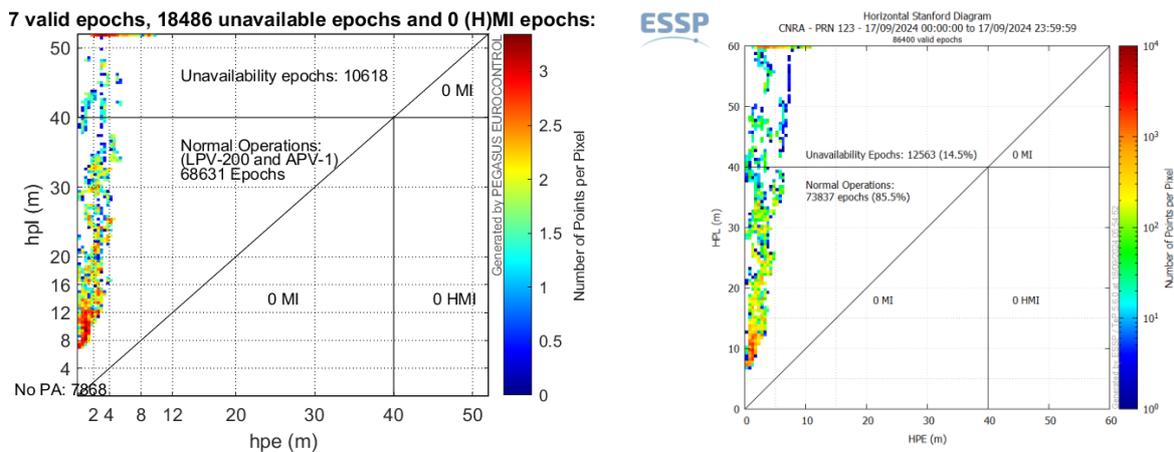


Figura 4-5. Comparación de diagrama de Stanford horizontal de PEGASUS (izquierda) y EGNOS (derecha) para la estación CNRA el día 17/09/2024

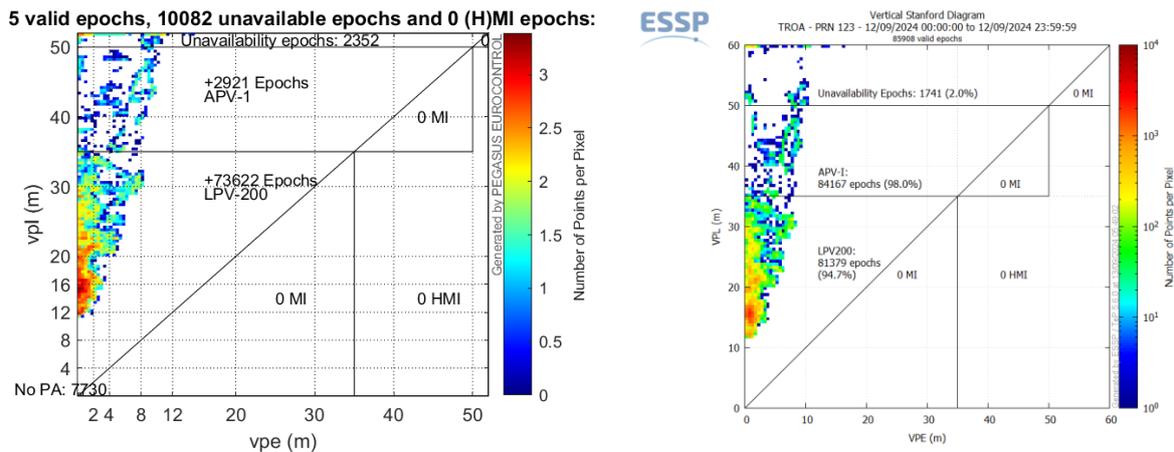


Figura 4-6. Comparación de diagrama de Stanford vertical de PEGASUS (izquierda) y EGNOS (derecha) para la estación TROA el día 12/09/2024

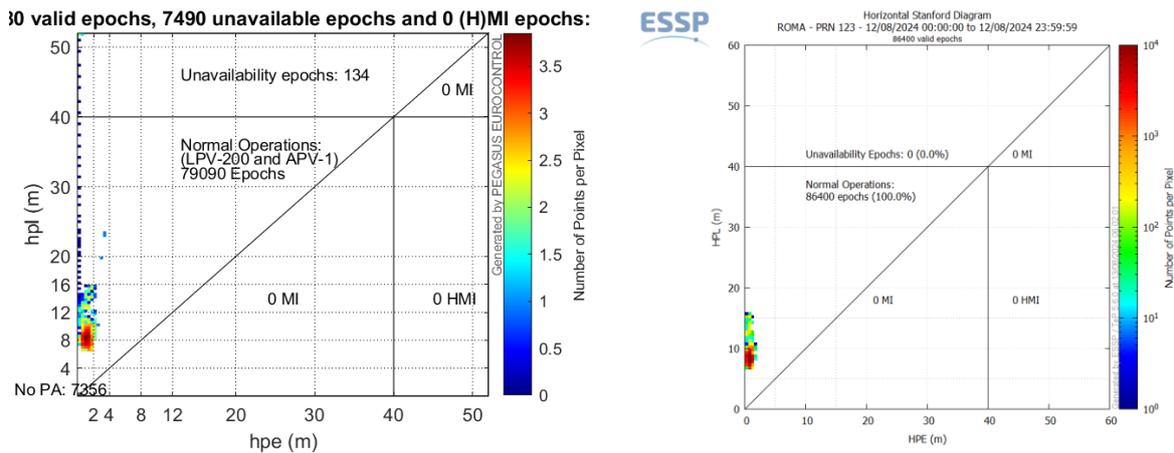


Figura 4-7. Comparación de diagrama de Stanford horizontal de PEGASUS (izquierda) y EGNOS (derecha) para la estación ROMA el día 12/08/2024

La comparación entre los diagramas de Stanford obtenidos mediante la simulación en PEGASUS y los diagramas oficiales proporcionados por EGNOS muestra una notable semejanza en la distribución de los datos y en la relación entre los errores de posición y los niveles de protección. Las tendencias observadas, así como la densidad y dispersión de los puntos en ambos conjuntos de gráficos, son prácticamente idénticas, lo que refuerza la fiabilidad del análisis realizado. Esta coincidencia valida la precisión de la simulación y confirma que los resultados obtenidos reflejan de manera realista el

comportamiento del sistema en condiciones operacionales, aumentando la confianza en las conclusiones que se derivarán de este estudio.

4.2.2 Resultados Tabulados

A continuación, se presenta una tabla que resume, por estación y por componente (horizontal y vertical) la información de los diagramas de Standford, es decir, los días con desempeño perfecto (100% de épocas dentro de LPV-200) y los días en los que se registraron épocas no disponibles. Para cada día con incidencias, se indica el porcentaje de épocas afectadas y, en el caso vertical, también el porcentaje restante cubierto dentro de LPV-200:

Tabla 4-3. % de épocas disponibles para los diagramas de Stanford horizontales de cada estación

Stand. H.	ALBA	CNRA	CRKA	RKKA	ROMA	SOFA	TROA
04/08	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	91.7	100.0
12/08	100.0	100.0	100.0	96.0	100.0	100.0	100.0
17/09	100.0	85.5	100.0	94.2	100.0	100.0	100.0
12/09	100.0	94.8	100.0	91.7	100.0	100.0	99.5
11/10	100.0	90.8	100.0	83.5	100.0	100.0	100.0
10/10	99.6	78.3	100.0	74.0	100.0	100.0	98.1
09/11	100.0	88.2	100.0	69.8	100.0	100.0	96.9
10/11	99.6	100.0	100.0	85.4	100.0	99.7	95.4
17/12	100.0	97.1	100.0	98.6	100.0	99.5	100.0
09/12	100.0	86.4	100.0	95.1	100.0	100.0	100.0
26/08	100.0	90.5	100.0	99.6	100.0	100.0	100.0
15/08	100.0	96.5	100.0	97.4	100.0	100.0	100.0
05/09	100.0	78.2	100.0	94.0	100.0	100.0	100.0
22/09	100.0	90.4	100.0	98.6	100.0	100.0	100.0
25/10	100.0	84.8	100.0	96.6	100.0	100.0	100.0
13/10	100.0	75.1	100.0	97.6	100.0	99.8	100.0
28/11	100.0	72.4	100.0	94.5	100.0	100.0	100.0
18/11	100.0	92.4	100.0	99.4	100.0	100.0	100.0
26/12	100.0	98.9	100.0	99.9	100.0	100.0	100.0
27/12	100.0	96.9	100.0	99.8	100.0	100.0	100.0

Tabla 4-3. % de operación en LPV200 para los diagramas de Stanford verticales de cada estación

Stand. V.	ALBA	CNRA	CRKA	RKKA	ROMA	SOFA	TROA
04/08	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	59.5	100.0
12/08	100.0	100.0	100.0	68.1	100.0	100.0	99.7
17/09	100.0	65	100.0	74.6	100.0	100.0	99.5
12/09	100.0	86.9	100.0	55.4	100.0	100.0	94.7
11/10	100.0	90.1	100.0	58.5	100.0	99.5	100.0
10/10	99.4	60.4	100.0	56.6	100.0	99.3	84.0
09/11	99.8	74.1	100.0	28.9	100.0	100.0	87.6
10/11	100.0	77.7	100.0	49.5	100.0	100.0	86.7
17/12	100.0	98.4	100.0	89.7	100.0	96.9	98.6
09/12	100.0	69.5	100.0	68.5	100.0	100.0	99.1
26/08	100.0	79.6	100.0	90.6	100.0	100.0	100.0
15/08	100.0	95.9	100.0	89.4	100.0	100.0	100.0
05/09	100.0	57.2	100.0	73.1	99.9	100.0	99.8
22/09	100.0	85.0	100.0	86.2	100.0	100.0	100.0
25/10	100.0	80.3	100.0	77.4	100.0	100.0	99.8
13/10	100.0	55.3	100.0	81.4	100.0	98.9	99.0
28/11	100.0	60.5	100.0	75.4	99.9	100.0	100.0
18/11	100.0	74.7	100.0	93.5	100.0	100.0	100.0
26/12	100.0	95.0	100.0	94.0	100.0	100.0	99.2
27/12	100.0	91.5	100.0	92.5	100.0	100.0	99.0

Para todos los días y estaciones analizados se puede confirmar que no hubo ningún evento de integridad, es decir, la integridad se mantuvo. Esto se puede observar cuando el error de posición (eje horizontal) es siempre menor que el error de protección (eje vertical), es decir, cuando todos los datos se encuentran por encima de la diagonal.

Sin embargo, este dato no es el único a tener en cuenta a la hora de analizar los diagramas de Stanford. La línea horizontal de los diagramas muestra el Alert Limit o límite de alerta. Esto quiere decir que, aunque el sistema es seguro al mantener la integridad, el límite de protección es demasiado grande para soportar los requisitos de la operación LPV200. Para operaciones LPV200, el límite de alerta horizontal es 40m y el vertical 35m.

No obstante, la disponibilidad de servicio para operaciones LPV-200, evaluada a partir del porcentaje de épocas en las que el nivel de protección se mantuvo por debajo del límite de alerta (Alert Limit, AL), varió entre estaciones y días. En estaciones como ALBA, CRKA y ROMA, se alcanzaron de forma consistente niveles del 100 % de disponibilidad vertical para LPV-200, lo que demuestra un margen de integridad amplio y sostenido. Sin embargo, otras estaciones como CNRA y RKKA presentaron una disponibilidad más reducida en ciertos días, con mínimos del 55.3 % y 28.9 % respectivamente. Estas reducciones en la disponibilidad no comprometen la integridad del sistema, pero sí indican que en esas franjas temporales el sistema no era apto para operaciones de aproximación de precisión en esas localizaciones.

Continuando con los resultados de integridad para un análisis más detallado, la siguiente tabla presenta los valores obtenidos para HSI y VSI durante los 20 días de observación, permitiendo evaluar la estabilidad y confiabilidad del sistema en diferentes condiciones de actividad ionosférica.

Tabla 4-3. Resultados de integridad horizontal

HSI	ALBA	CNRA	CRKA	RKKA	ROMA	SOFA	TROA
04/08	0.057313	0.087007	0.078098	0.040017	0.125186	0.081063	0.053807
12/08	0.065314	0.087445	0.087430	0.039445	0.135041	0.078740	0.096194
17/09	0.056378	0.109639	0.050871	0.038476	0.153923	0.091355	0.050029
12/09	0.076421	0.073257	0.078551	0.039843	0.147675	0.075390	0.056403
11/10	0.055890	0.083447	0.047265	0.044639	0.124507	0.061616	0.067459
10/10	0.055506	No disponible	No disponible	0.043529	No disponible	0.072187	0.064407
09/11	0.090794	0.081196	0.066922	No disponible	0.119010	0.071347	0.062532
10/11	0.059688	0.083847	0.074532	0.038578	0.119023	0.075556	0.060109
17/12	0.054009	0.078507	0.062052	0.047825	0.108760	0.065207	0.069267
09/12	0.069174	0.103145	0.0775704	0.053632	0.122525	0.070133	0.058382
26/08	0.052076	No disponible	0.055795	0.000000	0.144083	0.076709	0.060049
15/08	0.050328	0.094757	0.05880	0.041690	0.138436	0.069704	0.110800
05/09	0.062509	0.081431	0.058553	0.044305	0.127088	0.067393	0.062904
22/09	0.043593	0.097457	0.059779	0.041720	0.136367	0.065562	0.062324
25/10	0.067393	0.098537	0.069704	0.044500	0.126693	0.071962	0.063423
13/10	0.040425	0.099167	0.055856	0.036495	0.143128	0.072529	0.065253
28/11	0.058541	0.092275	0.062533	0.046010	0.118865	0.094241	0.063852
18/11	0.050323	0.092380	0.068322	0.042029	0.134019	0.076441	0.059861
26/12	0.051769	0.101074	0.054962	0.036902	0.119918	0.072643	0.050937
27/12	0.052512	0.102420	0.064250	0.047126	0.127157	0.069950	0.068935

Tabla 4-4. Resultados de integridad vertical

VSI	ALBA	CNRA	CRKA	RKKA	ROMA	SOFA	TROA
04/08	0.052960	0.067157	0.039994	0.043067	0.039100	0.055521	0.057901
12/08	0.084503	0.081990	0.060315	0.038914	0.041977	0.053587	0.104641
17/09	0.055462	0.053673	0.045517	0.036631	0.042131	0.063366	0.054038
12/09	0.081182	0.087841	0.056784	0.050214	0.078738	0.067687	0.059347
11/10	0.056038	0.048221	0.033967	0.041835	0.041331	0.052030	0.053125
10/10	0.057854	No disponible	No disponible	0.033809	No disponible	0.054524	0.052539
09/11	0.089571	0.085795	0.051556	No disponible	0.044896	0.058559	0.068239
10/11	0.065990	0.067202	0.056400	0.038823	0.038884	0.052446	0.073991
17/12	0.067645	0.043558	0.070104	0.047399	0.039886	0.044216	0.061915
09/12	0.078765	0.048206	0.064913	0.051157	0.054770	0.054210	0.085682
26/08	0.044876	No disponible	0.035602	0.000000	0.049053	0.050461	0.057200
15/08	0.057029	0.063267	0.050044	0.034340	0.038481	0.055984	0.089873
05/09	0.050427	0.091972	0.040425	0.029788	0.050189	0.060320	0.050765
22/09	0.039863	0.048825	0.048477	0.039844	0.039859	0.056519	0.068068
25/10	0.069537	0.067852	0.055204	0.040785	0.034653	0.051215	0.048694
13/10	0.042758	0.046855	0.039649	0.039403	0.039391	0.048331	0.051452
28/11	0.063831	0.048568	0.063279	0.043061	0.042590	0.070138	0.060780
18/11	0.051257	0.046125	0.065252	0.037243	0.038246	0.045313	0.054491
26/12	0.084656	0.042478	0.070608	0.038777	0.038364	0.042180	0.061120
27/12	0.091925	0.045335	0.069278	0.043284	0.036274	0.044772	0.061310

El análisis de integridad a partir de los valores de HSI (Horizontal Safety Index) y VSI (Vertical Safety Index) permite evaluar la capacidad del sistema SBAS para detectar y mitigar posibles errores en la posición del usuario. Dado que la integridad es un aspecto crítico en las aproximaciones LPV-200, los

valores obtenidos deben ser comparados con los límites de protección para determinar si el sistema cumple con los requisitos establecidos.

En todas las estaciones y fechas analizadas, los valores de HSI y VSI son extremadamente bajos, lo que indica que el sistema SBAS mantiene márgenes de seguridad elevados en términos de integridad.

No se observan valores que comprometan el cumplimiento de los criterios de integridad de LPV-200, lo que confirma la fiabilidad del sistema en la mayoría de los escenarios evaluados.

Estaciones como ALBA, RKKA y SOFA presentan valores constantemente bajos en HSI y VSI, con márgenes de seguridad elevados y sin picos de valores atípicos. Esto sugiere que el rendimiento del sistema en estas ubicaciones es altamente confiable y consistente con los estándares requeridos para LPV-200.

En estaciones como CNRA y ROMA, aunque los valores de HSI y VSI siguen siendo bajos, presentan una mayor variabilidad en comparación con otras estaciones. Esto puede deberse a factores como la actividad ionosférica, interferencias locales o efectos de multipath, que pueden influir en la integridad de la señal en ciertas condiciones.

No se identifican valores que indiquen una violación del umbral de seguridad en ninguna de las estaciones, lo que respalda la estabilidad del sistema SBAS en términos de integridad.

4.3 Disponibilidad

La disponibilidad es un parámetro clave en la evaluación del rendimiento de un sistema SBAS, ya que indica el porcentaje de tiempo en el que el servicio está operativo y proporcionando información dentro de los límites de precisión e integridad requeridos. Para la categoría LPV-200, la Organización de Aviación Civil Internacional (OACI) establece que la disponibilidad del servicio no debe ser inferior al 99%, asegurando así un nivel de confiabilidad adecuado para operaciones críticas.

En este análisis, los resultados de disponibilidad han sido obtenidos a partir de la página web de EGNOS User Support, específicamente en el apartado de Historical Performance, que proporciona datos sobre el desempeño histórico del sistema en diferentes ubicaciones. Al igual que en la validación a largo plazo, estos datos se presentan en forma de mapas con una escala de colores que representa gradualmente los niveles de disponibilidad en cada región.

Para cuantificar estos valores en el contexto de este estudio, se han extraído los datos de disponibilidad correspondientes a las siete estaciones analizadas y para cada uno de los 20 días de observación, generando una tabla con los valores específicos para cada ubicación y fecha.

Tabla 4-5. Resultados de disponibilidad

	ALBA	CNRA	CRKA	RKKA	ROMA	SOFA	TROA
04/08	≥99.9	≥99.9	≥99.9	No Disponible	≥99.9	≥99.9	≥99.9
12/08	≥99.9	≥99.9	≥99.9	No Disponible	≥99.9	≥99.9	≥99.9
17/09	≥99.9	<70	≥99.9	≥90	≥99.9	≥99.9	≥99.9
12/09	≥99.9	≥80	≥99.9	≥70	≥99.9	≥99.9	≥95
11/10	≥99.9	≥90	≥99.9	≥80	≥99.9	≥99.9	≥99.9
10/10	≥99	<70	≥99.9	<70	≥99.9	≥99	≥99.9
09/11	≥99	≥70	≥99.9	<70	≥99.9	≥99.9	≥80
10/11	≥99.9	≥70	≥99.9	≥70	≥99.9	≥99.9	≥95
17/12	≥99.9	≥98	≥99.9	≥90	≥99.9	≥99.9	≥99
09/12	≥99.9	<70	≥99.9	≥90	≥99.9	≥99.9	≥99
26/08	≥99.9	≥80	≥99.9	No Disponible	≥99.9	≥99.9	≥99.9
15/08	≥99.9	≥95	≥99.9	No Disponible	≥99.9	≥99.9	≥99.9
05/09	≥99.9	<70	≥99.9	No Disponible	≥99.9	≥99.9	≥99.9
22/09	≥99.9	≥80	≥99.9	≥98	≥99.9	≥99.9	≥99.9
25/10	≥99.9	≥80	≥99.9	≥95	≥99.9	≥99.9	≥99.9
13/10	≥99.9	<70	≥99.9	≥95	≥99.9	≥99.9	≥99
28/11	≥99.9	<70	≥99.9	≥90	≥99.9	≥99	≥99.9
18/11	No data	No data	No data	No data	No data	No data	No data
26/12	≥99.9	≥95	≥99.9	≥98	≥99.9	≥99.9	≥99
27/12	≥99.9	≥90	≥99.9	≥95	≥99.9	≥99.9	≥99

Los resultados de disponibilidad confirman que el sistema SBAS proporciona un servicio confiable en la mayoría de las estaciones analizadas, cumpliendo con el requisito del 99% de disponibilidad para LPV-200. No obstante, se identifican desafíos en latitudes bajas y altas, donde la disponibilidad puede verse afectada por fenómenos ionosféricos y geomagnéticos. Se analiza estación a estación los resultados de la disponibilidad obtenidos.

- ALBA y CRKA: Su ubicación en regiones centrales y septentrionales de Europa parece favorecer una señal SBAS estable, con mínimas afectaciones por actividad ionosférica.
- ROMA y SOFA: Estas estaciones, ubicadas en el sur de Europa, también muestran alta disponibilidad, lo que sugiere que las condiciones geográficas y la cobertura del sistema SBAS en estas regiones son óptimas.
- TROA: A pesar de estar en una latitud alta, donde los efectos ionosféricos suelen ser más intensos, esta estación mantiene valores de disponibilidad adecuados, lo que indica una buena recepción del servicio SBAS incluso en estas condiciones.
- Las estaciones de CNRA (Canarias, España) y RKKA (Reikiavik, Islandia) muestran valores de disponibilidad inferiores al 99% en varias fechas, lo que podría estar relacionado con factores ambientales y geográficos.

- CNRA (Islas Canarias)

Presenta valores de disponibilidad por debajo del 70% en múltiples días, lo que sugiere que la cobertura SBAS en esta latitud más baja podría no ser óptima.

La proximidad al ecuador geomagnético aumenta la influencia de perturbaciones ionosféricas como las burbujas ecuatoriales, lo que puede afectar la estabilidad del servicio.

Esto sugiere que las regiones cercanas al ecuador pueden experimentar más interrupciones en la disponibilidad del sistema SBAS.

- RKKA (Reikiavik, Islandia)

Presenta valores de disponibilidad inferiores al 99% en varias fechas, llegando a caer por debajo del 70%.

Su ubicación en latitudes altas la expone a fenómenos como las tormentas geomagnéticas y la influencia de la aurora boreal, que pueden afectar la propagación de la señal SBAS.

La reducción en la disponibilidad podría estar relacionada con períodos de alta actividad solar, lo que refuerza la importancia de considerar las condiciones ionosféricas en el análisis de la continuidad del sistema.

En general, las estaciones ubicadas en latitudes medias y altas de Europa (ALBA, CRKA, ROMA, SOFA, TROA) presentan una disponibilidad superior al 99%, lo que sugiere que la cobertura SBAS en estas regiones es óptima para operaciones LPV-200.

Sin embargo, en latitudes extremas (CNRA y RKKA), la disponibilidad es más variable, lo que podría comprometer la continuidad del servicio en ciertas condiciones.

4.4 Continuidad

La continuidad es un parámetro clave en la evaluación del desempeño de un sistema SBAS, ya que mide su capacidad para proporcionar un servicio ininterrumpido durante un período de tiempo determinado. En el caso de aproximaciones LPV-200, la OACI establece que la continuidad debe mantenerse por encima de un umbral mínimo de 1 a $8 \cdot 10^{-6}$ por cada 15 segundos, garantizando que las interrupciones en el servicio sean extremadamente raras y minimizando el riesgo de fallos durante una operación crítica de aproximación y aterrizaje.

Siguiendo el mismo enfoque que en la evaluación de disponibilidad, los resultados de continuidad han sido obtenidos de la página web de EGNOS User Support, dentro del apartado de Historical Performance. Esta información se presenta en forma de mapas de continuidad, donde los valores se representan mediante una escala de colores que permite visualizar el comportamiento del sistema en diferentes ubicaciones geográficas.

Tabla 4-6. Resultados de continuidad

	ALBA	CNRA	CRKA	RKKA	ROMA	SOFA	TROA
04/08	$\leq 1 \cdot 10^{-4}$	$\leq 5 \cdot 10^{-4}$	$\leq 1 \cdot 10^{-4}$	No Disponible	$\leq 1 \cdot 10^{-4}$	$\leq 1 \cdot 10^{-4}$	$\leq 1 \cdot 10^{-4}$
12/08	$\leq 1 \cdot 10^{-4}$	$\leq 1 \cdot 10^{-4}$	$\leq 1 \cdot 10^{-4}$	No Disponible	$\leq 1 \cdot 10^{-4}$	$\leq 1 \cdot 10^{-4}$	$\leq 1 \cdot 10^{-4}$
17/09	$\leq 1 \cdot 10^{-4}$	$\leq 1 \cdot 10^{-2}$	$\leq 1 \cdot 10^{-4}$	$\leq 5 \cdot 10^{-3}$	$\leq 1 \cdot 10^{-4}$	$\leq 1 \cdot 10^{-4}$	$\leq 1 \cdot 10^{-4}$
12/09	$\leq 1 \cdot 10^{-4}$	$\leq 5 \cdot 10^{-3}$	$\leq 1 \cdot 10^{-4}$	$\leq 1 \cdot 10^{-2}$	$\leq 1 \cdot 10^{-4}$	$\leq 1 \cdot 10^{-4}$	$\leq 5 \cdot 10^{-3}$
11/10	$\leq 1 \cdot 10^{-4}$	$\leq 5 \cdot 10^{-3}$	$\leq 1 \cdot 10^{-4}$	$\leq 1 \cdot 10^{-2}$	$\leq 1 \cdot 10^{-4}$	$\leq 1 \cdot 10^{-4}$	$\leq 1 \cdot 10^{-3}$
10/10	$\leq 5 \cdot 10^{-4}$	$\leq 5 \cdot 10^{-3}$	$\leq 1 \cdot 10^{-4}$	$\leq 5 \cdot 10^{-3}$	$\leq 1 \cdot 10^{-4}$	$\leq 5 \cdot 10^{-4}$	$\leq 5 \cdot 10^{-3}$
09/11	$\leq 1 \cdot 10^{-4}$	$\leq 5 \cdot 10^{-3}$	$\leq 1 \cdot 10^{-4}$	$\leq 5 \cdot 10^{-3}$	$\leq 1 \cdot 10^{-4}$	$\leq 5 \cdot 10^{-4}$	$\leq 5 \cdot 10^{-3}$
10/11	$\leq 1 \cdot 10^{-4}$	$\leq 1 \cdot 10^{-3}$	$\leq 1 \cdot 10^{-4}$	$\leq 1 \cdot 10^{-2}$	$\leq 1 \cdot 10^{-4}$	$\leq 1 \cdot 10^{-4}$	$\leq 5 \cdot 10^{-3}$
17/12	$\leq 1 \cdot 10^{-4}$	$\leq 1 \cdot 10^{-3}$	$\leq 1 \cdot 10^{-4}$	$\leq 5 \cdot 10^{-3}$	$\leq 1 \cdot 10^{-4}$	$\leq 1 \cdot 10^{-4}$	$\leq 5 \cdot 10^{-4}$
09/12	$\leq 1 \cdot 10^{-4}$	$\leq 5 \cdot 10^{-3}$	$\leq 1 \cdot 10^{-4}$	$\leq 5 \cdot 10^{-3}$	$\leq 1 \cdot 10^{-4}$	$\leq 1 \cdot 10^{-4}$	$\leq 5 \cdot 10^{-4}$
26/08	$\leq 1 \cdot 10^{-4}$	$\leq 5 \cdot 10^{-3}$	$\leq 1 \cdot 10^{-4}$	No Disponible	$\leq 1 \cdot 10^{-4}$	$\leq 1 \cdot 10^{-4}$	$\leq 1 \cdot 10^{-4}$
15/08	$\leq 1 \cdot 10^{-4}$	$\leq 5 \cdot 10^{-3}$	$\leq 1 \cdot 10^{-4}$	No Disponible	$\leq 1 \cdot 10^{-4}$	$\leq 1 \cdot 10^{-4}$	$\leq 1 \cdot 10^{-4}$
05/09	$\leq 5 \cdot 10^{-4}$	$\leq 1 \cdot 10^{-2}$	$\leq 5 \cdot 10^{-4}$	No Disponible	$\leq 5 \cdot 10^{-4}$	$\leq 5 \cdot 10^{-4}$	$\leq 5 \cdot 10^{-4}$
22/09	$\leq 1 \cdot 10^{-4}$	$\leq 5 \cdot 10^{-3}$	$\leq 1 \cdot 10^{-4}$	$\leq 1 \cdot 10^{-3}$	$\leq 1 \cdot 10^{-4}$	$\leq 1 \cdot 10^{-4}$	$\leq 1 \cdot 10^{-4}$
25/10	$\leq 1 \cdot 10^{-4}$	$\leq 5 \cdot 10^{-3}$	$\leq 1 \cdot 10^{-4}$	$\leq 5 \cdot 10^{-3}$	$\leq 1 \cdot 10^{-4}$	$\leq 1 \cdot 10^{-4}$	$\leq 1 \cdot 10^{-4}$
13/10	$\leq 1 \cdot 10^{-4}$	$\leq 5 \cdot 10^{-3}$	$\leq 1 \cdot 10^{-4}$	$\leq 1 \cdot 10^{-3}$	$\leq 1 \cdot 10^{-4}$	$\leq 1 \cdot 10^{-4}$	$\leq 1 \cdot 10^{-3}$
28/11	$\leq 1 \cdot 10^{-4}$	$\leq 5 \cdot 10^{-3}$	$\leq 1 \cdot 10^{-4}$	$\leq 5 \cdot 10^{-3}$	$\leq 5 \cdot 10^{-4}$	$\leq 5 \cdot 10^{-4}$	$\leq 1 \cdot 10^{-4}$
18/11	No data						
26/12	$\leq 1 \cdot 10^{-4}$	$\leq 5 \cdot 10^{-3}$	$\leq 1 \cdot 10^{-4}$	$\leq 5 \cdot 10^{-3}$	$\leq 1 \cdot 10^{-4}$	$\leq 1 \cdot 10^{-4}$	$\leq 5 \cdot 10^{-4}$
27/12	$\leq 1 \cdot 10^{-4}$	$\leq 5 \cdot 10^{-3}$	$\leq 1 \cdot 10^{-4}$	$\leq 5 \cdot 10^{-3}$	$\leq 1 \cdot 10^{-4}$	$\leq 1 \cdot 10^{-4}$	$\leq 5 \cdot 10^{-4}$

Las estaciones ALBA (Aalborg), CRKA (Cork), ROMA (Roma), SOFA (Sofía) y TROA (Tromsø) han mostrado una continuidad altamente estable, manteniéndose dentro de los márgenes de seguridad exigidos por EGNOS para LPV-200 en todas las fechas analizadas. Esta consistencia indica que en estas

regiones el sistema SBAS opera sin interrupciones significativas, garantizando la fiabilidad del servicio para aproximaciones de precisión. La estabilidad de la continuidad en estas estaciones sugiere que la cobertura SBAS en Europa central y septentrional es óptima para garantizar operaciones sin fallos.

Sin embargo, las estaciones CNRA (Canarias) y RKKA (Reikiavik) presentan valores de continuidad por debajo del umbral de seguridad en varias fechas, lo que indica la presencia de interrupciones en el servicio. En el caso de CNRA, ubicada en una latitud baja (27.95°N), la continuidad es irregular en múltiples días, lo que podría estar relacionado con perturbaciones ionosféricas ecuatoriales. Este comportamiento sugiere que, en regiones cercanas al ecuador geomagnético, el sistema SBAS puede experimentar fluctuaciones en la señal que comprometen la estabilidad del servicio.

Por otro lado, en RKKA (Reikiavik, 64.13°N), la continuidad también presenta variaciones significativas, con caídas en determinados días. La ubicación de esta estación en latitudes altas la expone a fenómenos como las tormentas geomagnéticas y la actividad auroral, que pueden afectar la propagación de la señal GNSS y provocar interrupciones en la continuidad del servicio. Esta tendencia indica que, en zonas cercanas a los polos, el sistema SBAS puede enfrentar desafíos adicionales debido a las condiciones geomagnéticas extremas.

Los datos sugieren que, mientras que en regiones de latitudes medias y altas dentro de Europa continental la continuidad del sistema SBAS es estable y confiable, en latitudes más extremas, ya sea en el norte como Reikiavik o en el sur como Canarias, pueden existir fluctuaciones que afectan la estabilidad del servicio. Estos resultados refuerzan la necesidad de monitorear el desempeño del sistema en estas áreas, especialmente en escenarios de alta actividad solar.

5 Conclusiones del Estudio

El análisis realizado permite establecer una relación clara entre la actividad solar y geomagnética y el rendimiento del sistema EGNOS en términos de precisión, integridad, disponibilidad y continuidad, especialmente en el contexto de operaciones LPV-200. A continuación, se presentan las conclusiones principales extraídas del estudio:

1. Precisión del sistema EGNOS y cumplimiento de LPV-200

Los resultados del análisis de precisión horizontal (HPE) y vertical (VPE) en diferentes estaciones europeas durante varios días del año 2024 confirman el cumplimiento de los requisitos establecidos para aproximaciones LPV200. Todas las estaciones presentan valores dentro de los márgenes operativos, destacando ALBA y CRKA por su estabilidad y precisión. Las estaciones CNRA y TROA muestran valores más elevados, aunque sin comprometer la integridad del sistema. Se observan picos puntuales de VPE asociados a posibles eventos de alta actividad solar, lo que sugiere la necesidad de un análisis complementario sobre la influencia de la ionosfera. En conjunto, los datos respaldan la viabilidad del uso del sistema EGNOS para aproximaciones LPV200 en diferentes entornos geográficos y condiciones ionosféricas variables.

2. Integridad alta y consistente, incluso en condiciones adversas

En todas las estaciones y fechas analizadas, no se detectaron eventos de integridad, lo que confirma que EGNOS mantuvo en todo momento el error de posición acotado por el nivel de protección. Los valores de HSI y VSI se mantuvieron bajos, indicando márgenes de seguridad elevados. Estaciones como ALBA, RKKA y SOFA mostraron un rendimiento especialmente estable, mientras que CNRA y ROMA presentaron algo más de variabilidad, posiblemente debido a condiciones locales o ionosféricas. En ningún caso se superaron los umbrales establecidos para operaciones LPV-200, lo que respalda la fiabilidad del sistema en términos de integridad.

3. Disponibilidad afectada por la ubicación geográfica y la actividad solar

Si bien la mayoría de las estaciones (ALBA, CRKA, ROMA, SOFA, TROA) mantienen una disponibilidad superior al 99% conforme a los requisitos OACI, se observaron limitaciones importantes en CNRA y RKKA (Reikiavik). En estas dos estaciones, la disponibilidad cayó por debajo del umbral mínimo en varias fechas, con valores inferiores al 70% en algunos casos. Estas reducciones coinciden con periodos de alta actividad solar, lo que evidencia la influencia directa de las condiciones ionosféricas sobre la continuidad del servicio, particularmente en latitudes extremas.

4. Continuidad comprometida en latitudes extremas

De forma similar a la disponibilidad, la continuidad del servicio SBAS fue adecuada en la mayoría de las estaciones europeas. Sin embargo, tanto CNRA como RKKA presentaron múltiples fechas con valores por debajo del umbral de seguridad exigido para LPV-200. Las interrupciones en la continuidad del servicio en estas estaciones pueden atribuirse a fenómenos como burbujas ionosféricas ecuatoriales

(CNRA) o tormentas geomagnéticas y actividad auroral (RKKA), lo que resalta la sensibilidad del sistema a las condiciones del entorno ionosférico.

5. Impacto de la actividad solar en el rendimiento global del sistema

A través del análisis temporal y geográfico de las prestaciones del sistema, se confirma que los días de alta actividad solar tienden a presentar mayor cantidad de incidencias en precisión, disponibilidad y continuidad. Esto subraya la necesidad de seguir monitorizando el impacto del ciclo solar en los sistemas GNSS aumentados por SBAS, especialmente en fases de máxima actividad solar como la que se vivió en 2024.

6. Importancia de la ubicación para la fiabilidad del servicio SBAS

Las estaciones situadas en latitudes medias, especialmente aquellas ubicadas en Europa central y septentrional (ALBA, CRKA, SOFA), demostraron ser las más robustas frente a los efectos de la actividad solar, manteniendo prestaciones dentro de los estándares requeridos incluso en días de alta perturbación. Estas ubicaciones parecen ofrecer un entorno más estable para el uso del sistema EGNOS en aplicaciones críticas como las aproximaciones LPV-200.

5.1 Posibles implicaciones para la navegación aérea y cumplimiento de estándares OACI

El análisis detallado del desempeño del sistema SBAS a través de los parámetros de precisión, integridad, disponibilidad y continuidad permite evaluar su idoneidad para operaciones de aproximación de precisión conforme a los estándares establecidos por la Organización de Aviación Civil Internacional (OACI), en particular para procedimientos LPV-200.

- Los resultados muestran que, en términos de integridad, el sistema EGNOS mantiene márgenes de seguridad elevados, sin registrar ningún evento de integridad en las estaciones ni fechas analizadas. La relación entre el error de posición y el nivel de protección se mantuvo siempre dentro de los márgenes seguros, como indican los valores bajos de los índices HSI y VSI y la ausencia de puntos en el lado derecho de la diagonal en los diagramas de Stanford-ESA. Esto garantiza que el sistema es confiable y seguro desde el punto de vista de la integridad, uno de los pilares fundamentales para la navegación aérea en entornos críticos.
- No obstante, el cumplimiento de los requisitos de precisión varía según la estación. Aunque la mayoría de ubicaciones mantuvieron los errores de posición dentro de los límites exigidos para LPV-200 (16 m en horizontal y 4–6 m en vertical), se identificaron excepciones relevantes, como en la estación ROMA, donde se registraron valores anómalamente altos tanto en HSNE como en VSNE. Estos picos, probablemente asociados a condiciones locales o a alta actividad ionosférica, comprometen la aptitud del sistema para operaciones LPV-200 en esos casos concretos.

- La disponibilidad del sistema cumple generalmente con el umbral del 99% requerido por OACI en la mayoría de las estaciones situadas en Europa continental. Sin embargo, en ubicaciones extremas como las Islas Canarias (CNRA) o Reikiavik (RKKA), se observaron caídas significativas en la disponibilidad del servicio, especialmente en días con mayor actividad geomagnética o ionosférica. Estas reducciones pueden limitar el uso del sistema para aproximaciones de precisión en dichas regiones, al no garantizarse el nivel mínimo de servicio requerido en todo momento.
- De forma similar, los resultados de continuidad indican un comportamiento robusto en estaciones como ALBA, CRKA o ROMA, donde el servicio se mantiene sin interrupciones significativas. En cambio, estaciones en latitudes extremas, como CNRA y RKKA, muestran una mayor variabilidad y, en ocasiones, valores por debajo del umbral mínimo, lo cual podría suponer un riesgo operacional si no se garantiza la continuidad del servicio durante una aproximación crítica.

En conjunto, los resultados evidencian que el sistema SBAS evaluado es adecuado para operaciones LPV-200 en gran parte del territorio europeo, cumpliendo con los requisitos de OACI en cuanto a integridad, precisión, disponibilidad y continuidad. No obstante, en regiones expuestas a fenómenos ionosféricos más intensos, como latitudes altas o bajas, es necesario un seguimiento continuo del desempeño, ya que en ciertos escenarios se han detectado limitaciones que podrían comprometer la prestación del servicio conforme a los estándares exigidos para navegación aérea de precisión.

5.2 Limitaciones del estudio

Si bien los resultados obtenidos en este estudio permiten evaluar con un alto grado de detalle el comportamiento del sistema SBAS en relación con los requisitos operacionales establecidos por la OACI para aproximaciones LPV-200, es importante señalar una serie de limitaciones que deben tenerse en cuenta a la hora de interpretar los hallazgos.

En primer lugar, el análisis se ha basado en un conjunto limitado de estaciones receptoras distribuidas geográficamente por Europa. Aunque se ha procurado incluir ubicaciones representativas de diferentes latitudes y condiciones geofísicas, los resultados no necesariamente reflejan el comportamiento global del sistema en todas las regiones del área de cobertura de EGNOS, especialmente en entornos extremos o en zonas con obstrucciones locales.

Asimismo, el periodo de observación comprende 20 días concretos durante el año 2024. Aunque se han seleccionado fechas con distintas condiciones ionosféricas para captar variabilidad en el desempeño, este intervalo temporal no permite extraer conclusiones absolutas sobre el comportamiento a largo plazo del sistema ni sobre su respuesta frente a eventos extremos poco frecuentes, como tormentas solares severas.

Por otro lado, el estudio se ha centrado en el análisis postprocesado de datos mediante el software PEGASUS, lo que implica que no se ha evaluado el rendimiento del sistema en condiciones operacionales en tiempo real. Factores como retrasos en la recepción de correcciones diferenciales, errores de usuario

o problemas en la cadena de procesamiento en tiempo real podrían afectar la experiencia práctica de los operadores y no han sido considerados directamente en este análisis.

Además, si bien se ha validado la simulación comparando los resultados con diagramas oficiales de EGNOS, pueden existir pequeñas discrepancias debidas a diferencias en la configuración del software, en el filtrado de datos o en la modelización de errores, que podrían influir ligeramente en los valores numéricos obtenidos.

Finalmente, no se ha realizado un análisis exhaustivo de la causa raíz de los valores anómalos identificados en algunas estaciones, como los picos de error observados en ROMA o CNRA. Si bien se han propuesto hipótesis relacionadas con efectos ionosféricos o interferencias locales, se requeriría una investigación más profunda, con datos adicionales, para confirmar con certeza el origen de estas desviaciones.

En conjunto, estas limitaciones no invalidan los resultados obtenidos, pero sí acotan su alcance y refuerzan la necesidad de futuros estudios complementarios que amplíen el número de estaciones, el periodo de análisis y las condiciones consideradas, incluyendo también escenarios operacionales reales.

6 Bibliografía

- [1] GMV, "EGNOS General Introduction." Accessed: Feb. 15, 2025. [Online]. Available: https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/EGNOS_General_Introduction
- [2] GMV, "GPS Performances." Accessed: Feb. 15, 2025. [Online]. Available: https://gssc.esa.int/navipedia/index.php?title=GPS_Performances
- [3] GMV, "EGNOS Performances." Accessed: Feb. 15, 2025. [Online]. Available: https://gssc.esa.int/navipedia/index.php?title=EGNOS_Performances
- [4] EGNOS Euspa, "Gradual increase of solar activity and its effect on GNSS." Accessed: Feb. 15, 2025. [Online]. Available: <https://egnos.gsc-europa.eu/news-events/news/gradual-increase-solar-activity-and-its-effect-gnss>
- [5] J. Sanz Subirana, J.M. Juan Zornoza, and M. Hernández-Pajares, *GNSS DATA PROCESSING. Volume I: Fundamentals and Algorithms*, vol. 1. ESA Communications, 2013.
- [6] EGNOS EUSPA, "EGNOS." Accessed: Feb. 15, 2025. [Online]. Available: <https://egnos.gsc-europa.eu/egnos-system/about-egnos>
- [7] NOAA and NASA, "Solar Cycle Progression," <https://testbed.spaceweather.gov/products/solar-cycle-progression-updated-prediction-experimental>.
- [8] J. Arenas, E. Sardón, A. Sainz, B. Ochoa, and S. Magdaleno, "Low-latitude ionospheric effects on SBAS," *Radio Sci*, vol. 51, no. 6, pp. 603–618, Jun. 2016, doi: 10.1002/2015RS005863.
- [9] German Research Centre for Geosciences (GFZ), "GFZ - Kp." Accessed: Feb. 23, 2025. [Online]. Available: <https://kp.gfz-potsdam.de/en/>
- [10] J. Matzka, C. Stolle, Y. Yamazaki, O. Bronkalla, and A. Morschhauser, "The Geomagnetic Kp Index and Derived Indices of Geomagnetic Activity," *Space Weather*, vol. 19, no. 5, May 2021, doi: 10.1029/2020SW002641.
- [11] National Oceanic and Atmospheric Administration, "Space Weather Prediction Center - Kp index." Accessed: Feb. 23, 2025. [Online]. Available: <https://www.swpc.noaa.gov/products/station-k-and-indices>
- [12] National Oceanic and Atmospheric Administration, "PRF User Guide-Users Guide to The Preliminary Report and Forecast of Solar Geophysical Data," 2012. [Online]. Available: <http://www.ngdc.noaa.gov/stp/>.
- [13] F. J. Rich, J. M. Bono, W. J. Burke, and L. C. Gentile, "Dst index," *J Geophys Res Space Phys*, vol. 112, no. 5, May 2007, doi: 10.1029/2005JA011586.
- [14] M. Mendillo, "Storms in the ionosphere: Patterns and processes for total electron content," Dec. 2006. doi: 10.1029/2005RG000193.

- [15] F. Clette, L. Svalgaard, W. W. Hansen, J. M. Vaquero, and E. W. Cliver, "Revisiting the Sunspot Number A 400-year perspective on the solar cycle."
- [16] D. F. Webb and T. A. Howard, "Coronal Mass Ejections: Observations," 2012. [Online]. Available: <http://www.livingreviews.org/lrsp-2012-3><http://www.boulder.swri.edu/~howard/>
- [17] GMV, "Accuracy." Accessed: Feb. 23, 2025. [Online]. Available: <https://gssc.esa.int/navipedia/index.php?title=Accuracy>
- [18] "165 - Monthly Performance Report - January 2025".
- [19] EGNOS, "2008 FEDERAL RADIONAVIGATION PLAN."
- [20] GMV, "Integrity." Accessed: Feb. 23, 2025. [Online]. Available: <https://gssc.esa.int/navipedia/index.php?title=Integrity>
- [21] GMV, "Continuity," 2011, Accessed: Feb. 23, 2025. [Online]. Available: <https://gssc.esa.int/navipedia/index.php?title=Continuity>
- [22] GMV, "Availability." Accessed: Feb. 23, 2025. [Online]. Available: <https://gssc.esa.int/navipedia/index.php?title=Availability>
- [23] gLAB Universidad Politécnica de Cataluña, "GNSS format descriptions." Accessed: Feb. 23, 2025. [Online]. Available: <https://gage.upc.edu/en/learning-materials/library/gnss-format-descriptions>
- [24] SKYbrary, "PBN." Accessed: Feb. 23, 2025. [Online]. Available: https://skybrary.aero/articles/precision-area-navigation-p-rnav#ICAO.27s_PBN_Concept
- [25] Centro alemán de investigación geodésica, "GFZ - Kp plots", Accessed: Mar. 08, 2025. [Online]. Available: <https://kp.gfz-potsdam.de/en/figures/kp-daily-plots>
- [26] Centro alemán de investigación geodésica, "GFZ - SN and Kp plots", Accessed: Mar. 08, 2025. [Online]. Available: <https://kp.gfz-potsdam.de/en/figures/sunspot-numbers-and-kp>
- [27] K. WDC for Geomagnetism, "WDC for Geomagnetism, Kyoto - Dst Values", Accessed: Mar. 08, 2025. [Online]. Available: https://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/dst_provisional/202410/index.html
- [28] DLR - Laboratorio de investigación de Alemania, "DLR - TEC plots and data", Accessed: Mar. 08, 2025. [Online]. Available: https://impc.dlr.de/SWE/Total_Electron_Content/TEC_Near_Real-Time/DLR_GNSS_GCG_L4_VTEC-NTCM-SCM_NC_EUROPE/v2.0.0/2024/
- [29] Centro alemán de investigación geodésica, "GFZ - F10.7", Accessed: Mar. 08, 2025. [Online]. Available: <https://kp.gfz-potsdam.de/en/data#c222>
- [30] The Catholic University of America and NASA, "SOHO LASCO CME CATALOG", Accessed: Mar. 08, 2025. [Online]. Available: https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/
- [31] "Title: PEGASUS Software User Manual : Module CONVERTOR GNSS Tools Team."
- [32] "PEG-SUM-Gnss_Solution".

- [33] "PEGASUS Software User Manual-MFILERUNNER Title: PEGASUS Software User Manual : Module MFILERUNNER GNSS Tools Team."