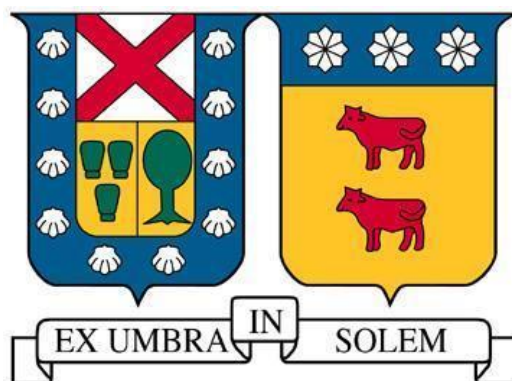


UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARIA

DEPARTAMENTO DE AERONÁUTICA
SANTIAGO – CHILE



ANÁLISIS DE PREFACTIBILIDAD DE INCORPORAR UN SISTEMA DE
AUMENTACIÓN DE PRECISIÓN EN LOS AERÓDROMOS DE CHILE:
GBAS V/S SBAS.

JOSEFA ANTONIA VILLAGRAN VILLEGAS

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERA EN AVIACIÓN COMERCIAL

PROFESOR(A) GUIA : SR. CRISTIAN CARVALLO G.
PROFESOR(A) CORREFERENTE: SR. JOSE PATRICIO MONTERROSA P.

JULIO 2025



CONSTANCIA DE VALIDACIÓN Y CONFIDENCIALIDAD DE MONOGRAFÍA A REPOSITORIO ACADÉMICO

1.- IDENTIFICACIÓN DEL TRABAJO ACADÉMICO

Tipo de monografía (marcar una opción): Memoria o trabajo de título; Tesis de Postgrado;

Título del trabajo: Análisis de prefactibilidad de incorporar un sistema de aumentación de precisión en los aeródromos de Chile: GBAS V/S SBAS.

Nombre del candidato(a): Josefa Antonia Villagrán Villegas.

Carrera / Grado: Ingeniería en aviación comercial.

Campus: Santiago Vitacura; Departamento: Aeronáutica.

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, *Cristian Carvalho González*, en mi calidad de profesor(a) guía/director(a) del trabajo académico mencionado anteriormente **DEJO CONSTANCIA** que:

- He revisado esta versión del documento y corresponde a la versión final aprobada del trabajo.
- El trabajo cumple con los requisitos académicos y de formato establecidos por la institución

3.- EVALUACIÓN DE CONFIDENCIALIDAD POR PROPIEDAD INDUSTRIAL

El trabajo **NO contiene información que amerite confidencialidad** y puede ser publicado de inmediato en repositorio con acceso abierto.

El trabajo **CONTIENE** información con potenciales implicancias de propiedad industrial o intelectual y requiere un periodo de confidencialidad (embargo) por:

6 meses; 12 meses; 2 años; 3 años; 5 años; 10 años

Fundamentación de la necesidad de confidencialidad (obligatorio si se solicita embargo):

----- No aplica -----

4.- FIRMAS

Profesor(a) guía o director(a) de memoria o tesis:

Fecha: *13-8-25*; Firma: 

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: 29-07-2025 ; Firma: 

Este formulario debe ser insertado como página 2 de la memoria o tesis, completado y firmado por estudiante y profesor(a) antes de la entrega en portal PRISMA de Biblioteca USM.

Dedicatoria.

Dedico este trabajo a todas las personas que estuvieron presentes y me contuvieron a lo largo de estos 5 años, especialmente a mis padres, quienes han sido mi apoyo incondicional, que, a pesar de estar a 800 km de distancia, siempre han sabido darme una palabra de aliento, confiar en mí y apoyarme en toda esta etapa universitaria.

A Sebastián, mi pareja, que me acompañó y aconsejó durante toda la carrera desde que postulé a la universidad hasta culminar esta etapa. Incluso, a pesar de la distancia, supo estar presente para mí.

A mi perrita Samantha, que me acompañó fielmente cada clase y estudio en mi pieza los dos años de pandemia, que me entregó siempre mucha energía y cariño cuando me sentía frustrada y/o cansada.

Finalmente, a mis amigos en la USM por cada trabajo, presentación y tardes de estudio y también a los profesores que me ayudaron con mi elección de tema de memoria, con apoyarme con información y recomendaciones para este trabajo.

Resumen.

En 2024, según los datos registrados en la JAC, Chile registró 531.226 operaciones aéreas, un 3,4% más que en 2023 y un 5% más que en 2019, el último año previo a la pandemia con mayor actividad aérea, destacando la evolución e importancia de la aviación en Chile. Lo que lleva a implementar tecnologías y sistemas de ayuda para la navegación que estén acordes a la eficiencia y seguridad operacional de los aeródromos del país. Por lo tanto, este trabajo surgió para actualizar y verificar el estado de implementación de sistemas de navegación con aumentación (GBAS o SBAS) en los aeródromos de Chile, los cuales son sistemas más nuevos y tecnológicos de ayuda para la aproximación que el actual ILS.

Se abordó el objetivo de analizar tanto operativa como económicamente la propuesta de implantar un sistema GBAS o SBAS, derivando también a otros objetivos para lograr el principal. Esto se llevó a cabo mediante la investigación exploratoria de estos sistemas de aumentación de precisión, sobre el funcionamiento, se compararon las características más significativas de cada sistema y su ventaja sobre el actual ILS, además de analizar y comparar con la implantación de estos sistemas en otros países.

Posteriormente, se evaluó esta propuesta realizando un análisis de los costos y beneficios de estas tecnologías, basándose en datos nacionales e internacionales. Se utilizó como parámetros de evaluación el costo monetario de inversión y mantención de GBAS y SBAS en comparación con el del sistema actual ILS y los beneficios que se obtienen al utilizar uno de estos sistemas, medidos en porcentajes, como el ahorro de combustible en las aeronaves, aumento en las operaciones, mayor precisión en la aproximación.

Con este trabajo se concluyó que el Satellite Based Augmentation Systems es la opción más viable para Chile, el cual propone una oportunidad para mejorar la seguridad de todos los aeródromos del país, la eficiencia y la capacidad de las operaciones aéreas. Este sistema logra cubrir en su totalidad la Red Aeroportuaria Nacional, ayudando así a todos los aeródromos que en la actualidad no cuentan con un sistema de ayuda a la aproximación.

Donde, el costo de implementación de un sistema SBAS para toda la Red Aeroportuaria Nacional (312 aeródromos) es de aproximadamente 10.002.284.827 CLP y para 21 aeródromos es de 13.066.342.233 CLP. Incluso, se debe considerar que el costo mencionado en SBAS se puede prorratear con otras industrias del país logrando así baja el monto de inversión inicial para la industria de la aviación

Con un enfoque estratégico, una planificación rigurosa y una colaboración efectiva entre todos los países del continente, es posible la implementación exitosa del sistema de ayuda a la aproximación SBAS para todos los aeródromos del país, siendo un potencial reemplazante del actual ILS CAT I.

Palabras clave: Sistema de aterrizaje por instrumentos (ILS), Sistema de aumento basado en satélites (SBAS), Sistema de aumento basado en tierra (GBAS), Seguridad operacional, Cobertura.

Abstract.

In 2024, according to data recorded at the JAC, Chile recorded 531,226 air operations, 3.4% more than in 2023 and 5% more than in 2019, the last year prior to the pandemic with greater air activity, highlighting the evolution and importance of aviation in Chile. Which leads to implement technologies and navigation aid systems that are in line with the efficiency and operational safety of the country's aerodromes. Therefore, this work arose to update and verify the implementation status of augmented navigation systems (GBAS or SBAS) in Chilean aerodromes, which are newer and more technological approach aid systems than the current ILS.

The objective was to analyze both operationally and economically the proposal to implement a GBAS or SBAS system, deriving also to other objectives to achieve the main one. This was carried out by means of an exploratory investigation of these precision augmentation systems, on their operation, comparing the most significant characteristics of each system and their advantage over the current ILS, as well as analyzing and comparing with the implementation of these systems in other countries.

Subsequently, this proposal was evaluated by performing an analysis of the costs and benefits of these technologies, based on national and international data. The evaluation parameters used were the monetary cost of investment and maintenance of GBAS and SBAS in comparison with the current ILS system and the benefits obtained by using one of these systems, measured in percentages, such as aircraft fuel savings, increased operations and greater precision in the approach.

With this work it was concluded that the Satellite based augmentation systems is the most viable option for Chile, which proposes an opportunity to improve the safety of all aerodromes in the country, the efficiency and capacity of air operations. This system is able to cover the entire National Airport Network, thus helping all airfields that currently do not have an approach aid system.

The cost of implementing an SBAS system for the entire National Airport Network (312 aerodromes) is approximately CLP 10.002.284.827, and for 21 aerodromes it is CLP 13.066.342.233. It should also be noted that the cost of the SBAS mentioned above can be shared among other industries in the country, which would reduce the initial investment for the aviation industry.

With a strategic approach, a rigorous planning and an effective collaboration among all the countries of the continent, the successful implementation of the SBAS approach aid system for all the aerodromes of the country is possible, being a potential replacement of the current ILS CAT I.

Key words: Instrument Landing System (ILS), Satellite-Based Augmentation System (SBAS), Ground-Based Augmentation System (GBAS), Operational Safety, Coverage.

Tabla de contenido

1	Antecedentes Generales	16
1.1	Justificación.....	16
1.2	Objetivos.....	20
1.3	Metodología y teoría a utilizar	21
1.4	Alcance.....	23
2	Estado del arte	25
2.1	Antecedentes	25
2.1.1	Red Aeroportuaria Nacional (RAN).....	25
2.1.2	Tipos de procedimientos de aproximación.....	28
2.1.3	Antecedentes del Instrument Landing System.	30
2.1.4	Investigación de nuevos sistemas de aumentación de precisión para la aproximación.	34
2.1.5	Infraestructura de sistema GBAS en otros aeropuertos.....	38
2.1.6	Continentes utilizando sistema SBAS.....	41
2.2	Marco teórico	44
2.2.1	Concepto ILS.....	44
2.2.2	Concepto GBAS	49
2.2.3	Concepto SBAS.....	51
2.2.4	Infraestructura y componentes.....	53
2.2.5	Limitaciones	58
2.3	Propuesta metodológica	61
3	Desarrollo.....	63
3.1	Catastro de procedimientos de aproximación por instrumentos en la Red Aeroportuaria Nacional.....	63

3.1.1	Sistema actual de ayuda a la aproximación ILS.....	66
3.1.2	Sistema de navegación BARO/VNAV.....	71
3.2	Comparativa operacional entre sistema ILS, GBAS y SBAS.....	76
3.2.1	Instrument Landing System.....	76
3.2.2	Ground Based Augmentation System	77
3.2.3	Satellite-based Augmentation System.....	79
3.3	Análisis aproximado de costos y beneficios económicos de SBAS y GBAS. .	84
3.3.1	Costos del sistema de ayuda a la aproximación ILS en Chile.....	84
3.3.2	Costos de un sistema GBAS.....	87
3.3.3	Costos de un sistema SBAS	88
3.4	Propuesta del sistema óptimo para Chile y etapas clave a considerar	92
3.4.1	Recomendaciones para la propuesta de implementación	94
3.4.2	Retrofit de las aeronaves con sistema SBAS.....	100
	Conclusiones y recomendaciones.	104
	Bibliografía.....	107

Índice de Ilustraciones.

Ilustración 1-1: Flujo de información sistema GBAS.	18
Ilustración 1-2: Esquema de la metodología a utilizar.	22
Ilustración 2-1: Red primaria aeroportuaria nacional.	26
Ilustración 2-2: Red secundaria aeroportuaria.	27
Ilustración 2-3: Red de pequeños aeródromos.	27
Ilustración 2-4: Búsqueda de número de publicaciones con la frase "aviation approach"...	35
Ilustración 2-5: Aeropuerto de Málaga Costa del sol, desde vista aérea.	38
Ilustración 2-6: Antenas y estación del sistema GBAS en Aeropuerto Costa del Sol.	39
Ilustración 2-7: Aeropuerto SYD mirado desde arriba.	40
Ilustración 2-8: Configuración de antenas y estación del sistema GBAS.	40
Ilustración 2-9: Regiones del mundo con SBAS.	41
Ilustración 2-10: Sistema ILS con sus componentes de localizador y senda de planeo.	46
Ilustración 2-11: Dimensiones del área crítica del Localizador según la categoría del ILS.	49
Ilustración 2-12: Dimensiones del área crítica de la senda de planeo según la categoría ILS y el tamaño de la aeronave. Fuente: SITING CRITERIA FOR INSTRUMENT LANDING SYSTEMS, FAA (2014).	49
Ilustración 2-13: Representación subsistemas de una instalación GBAS.	50
Ilustración 2-14: Infraestructura necesaria para un sistema SBAS.	51
Ilustración 2-15: Sistemas y componentes de GBAS.	55
Ilustración 2-16: Sistemas y componentes del SBAS.	57
Ilustración 2-17: Zonas según su latitud.	59
Ilustración 2-18: Esquema de la propuesta metodológica para analizar la prefactibilidad de implantación de un sistema de aumentación GNSS en los aeródromos de Chile.	61
Ilustración 3-1: Catastro de la implementación del sistema ILS y los procedimientos de aproximación utilizados por la Red Aeroportuaria Nacional.	64
Ilustración 3-2: Representación de las áreas protegidas del Localizador y Senda de Planeo de la pista 17L.	68
Ilustración 3-3: Fotografía de un área crítica del Ap. Arturo Merino Benítez.	68
Ilustración 3-4: Tarifario segundo trimestre 2025: Tasas de servicios ILS.	69

Ilustración 3-5: Total de aterrizajes nacionales en abril del 2025 en los aeródromos/aeropuertos que cuentan con ILS, exceptuando Ap. AMB.	70
Ilustración 3-6: Diagrama sobre el riesgo de CFIT.	72
Ilustración 3-7: Comparativa de las características principales de los sistemas ILS, GBAS y SBAS.	81
Ilustración 3-8: Costos asociados al sistema ILS y GBAS.	87
Ilustración 3-9: Países y sus respectivas operaciones en 2023 y 2024.	89
Ilustración 3-10: Análisis de rentabilidad de ANGA en África.	93
Ilustración 3-11: Pantalla de la cabina del piloto con sistema SBAS (SLS).	101
Ilustración 3-12: Aeronaves con sistema SBAS (SLS) de Airbus.	102
Ilustración 3-13: Aeronaves con sistema SBAS(SLS) de ATR.	102

Índice de Tablas.

Tabla 1-1: Costos totales de implementación de ILS CAT y GBAS CAT I.....	18
Tabla 2-1: Número de publicaciones encontradas sobre SBAS y GBAS en distintas bases de datos, desde 2014 a 2024.....	34
Tabla 2-2: Cantidad de componentes SBAS para EGNOS, WAAS y KAAS.	57
Tabla 3-1: Cantidad de aeródromos/aeropuertos por cada procedimiento/sistema de aproximación utilizado en Chile.....	65
Tabla 3-2: Implementación del sistema ILS y su categoría en la Red Primaria Aeroportuaria.	66
Tabla 3-3: Aeródromos y aeropuerto que utilizan un procedimiento de aproximación RNP AR.....	75
Tabla 3-4: Número de operaciones de aeronaves con actividad de transporte de pasajeros en 2024.	76
Tabla 3-5: Comparación Multicriterio de ILS, GBAS y SBAS.	83
Tabla 3-6: Montos del sistema ILS CAT I y las obras civiles para su implementación, en pesos chilenos.	85
Tabla 3-7: Comparativa de costos de implementación entre ILS y GBAS en pesos chilenos.	88
Tabla 3-8: Porcentaje de participación y monto en la inversión de SBAS por cada país de la región.	90
Tabla 3-9: Comparativa de costos de implementación y mantenimiento de ILS CAT I, GBAS y SBAS.	92

Índice de Gráficos.

Gráfico 2-1: Número de publicaciones desde 2014 a 2024 por cada frase en Web of Science.	35
Gráfico 2-2: Número de publicaciones desde 2014 a 2024 por cada frase en Scopus.	36
Gráfico 2-3: Número de publicaciones desde 2014 a 2024 por frase en Science Direct.	36

Introducción.

En el año 2024, según la JAC (*Tabla 1*), en Chile se realizaron un total de 531.226 operaciones de aeronaves, una cifra superior en un 3,4% con respecto al año 2023. Incluso, si se compara con el año 2019, siendo este el último año con mayor cantidad de operaciones antes de la pandemia, se obtiene un aumento de un 5%. Por otro lado, teniendo en cuenta que el aeropuerto principal del país es AMB, ya que, la mayor parte de los vuelos domésticos tienen conexión en Santiago de Chile y desde este aeropuerto se realizan mayoritariamente los vuelos internacionales, es relevante considerar que “con la ampliación del terminal existente, la capacidad de todo el complejo aéreo crece a más del doble, pasando de 16 a 38 millones de pasajeros por año...” (Nuevo Pudahuel, 2022). Estos datos muestran la real importancia y evolución de Chile en la aviación.

Tabla 1: Número de operaciones por año en el AP. Arturo Merino Benítez y en el total de aeródromos de Chile.

Operaciones		
Año	Aeropuerto Arturo Merino Benítez	Total aeródromos y aeropuertos de Chile
2019	174.238	505.786
2023	161.198	513.864
2024	178.247	531.226

Fuente: JAC.

El Instrument Landing System (ILS), es el actual sistema de ayuda a la aproximación utilizado alrededor del país. Este sistema lo que hace es guiar al piloto de forma vertical y horizontal hacia la pista hasta que observe suficientes referencias visuales para concretar la aproximación y aterrizar. Al año 2024 existen tres aeropuertos de Chile que cuentan con su categoría más alta IIIB, que permite que las aeronaves puedan aterrizar y despegar con hasta un mínimo de 50 metros de visibilidad. Incluso, 7 de los 17 aeropuertos/aeródromos de la Red Primaria no cuentan con esta ayuda de aproximación de precisión, dificultando los aterrizajes.

Con lo mencionado anteriormente, se evidencia que existe un crecimiento en el total de operaciones en el país, por lo que no solo se requiere tener una infraestructura de calidad sino también contar con los sistemas tecnológicos más eficientes, precisos y estables. Con relación

a los sistemas de ayuda para la navegación y aproximación, según la *Organización Internacional de Aviación Virtual (IVAO)*, el ILS posee desventajas que pueden afectar a la precisión y eficiencia de las operaciones, como errores del localizador o sendas de planeo falsas por los disturbios que se pueden generar en las señales, además de las áreas sensibles que se deben considerar, lo cual limita el entorno. Además, en el caso de aproximaciones de no precisión (sin ILS), “un ajuste erróneo del altímetro puede tener graves consecuencias para la seguridad del vuelo durante las operaciones de aproximación final” (ICAO, 2023).

Para continuar contribuyendo con los avances en Chile, se plantean dos sistemas de aumentación de precisión para la aproximación de aeronaves, uno basado en tierra (GBAS) y el otro basado en satélites (SBAS), con el objetivo de contar con una tecnología más precisa y eficiente que la actual. Estos sistemas tienen varias ventajas en comparación con el ILS tradicional, cuentan con la capacidad de atender varios puntos de aterrizaje y disminuir la cantidad total de sistemas necesarios en un aeropuerto, proporcionan una orientación y estabilidad mayor con relación al sistema actual.

Esta investigación se abordará desde una perspectiva operacional y técnica. Realizando un estudio de su funcionamiento, sus componentes y su operatividad en distintos países alrededor del mundo, para evidenciar resultados actuales en otros aeropuertos. Además, se compararán ambos sistemas de aproximación con el actual sistema operando en Chile, el ILS, para plasmar sus ventajas y debilidades. Con el fin de analizar la utilización de SBAS o GBAS en Chile, se evidenciarán los beneficios, limitaciones y desafíos de cada uno para recomendar una alternativa eficiente y tecnológica para los aeropuertos del país.

Capítulo 1.
Antecedentes Generales

1 Antecedentes Generales

1.1 Justificación

La industria aeronáutica debe estar en constante evolución, implementando mejoras que garanticen la seguridad, eficiencia y precisión en las operaciones aéreas, especialmente en los aterrizajes. En este sentido, la ampliación del Aeropuerto Internacional Arturo Merino Benítez (AMB) evidencia no solo el aumento proyectado de la demanda, sino también la necesidad de que la infraestructura y los sistemas aeronáuticos se modernicen acorde a estos desafíos. Tal como señala el Ministerio de Obras Públicas (2025), el objetivo es “construir un tercer terminal de pasajeros y una tercera pista con el objetivo triplicar la actual capacidad del aeropuerto internacional Arturo Merino Benítez (AMB) para el año 2050”, lo cual impulsa directamente a la industria a actualizar sus sistemas de navegación y aproximación, como parte esencial del desarrollo seguro y eficiente del transporte aéreo.

Con relación a aquello, “la ayuda más utilizada que tienen los aviones para la aproximación se llama ILS. Son las siglas de Instrument Landing System (sistema instrumental de aterrizaje), y aunque en la actualidad hay otras ayudas más modernas como las aproximaciones satelitales RNAV RNP, el ILS sigue siendo el procedimiento más popular de aproximación en los aeropuertos de todo el mundo.” (Piquero, 2015).

Durante los años 2024 y 2025, diversas situaciones han evidenciado la necesidad urgente de modernizar la infraestructura aeroportuaria en Chile, particularmente en lo relativo a sistemas de aproximación por instrumentos. El Aeródromo de La Florida, en La Serena, sufrió reiteradas cancelaciones de vuelos debido a la falta de un sistema ILS, lo que impidió las operaciones en condiciones de baja visibilidad. Entre el 22 de mayo y el 7 de julio de 2024, se registraron 98 vuelos cancelados por condiciones meteorológicas adversas (Diario La Región de Coquimbo, 2024).

De manera similar, el Aeropuerto El Tepual, en Puerto Montt, enfrentó serias limitaciones operativas en julio de 2024 por fallas en la senda de planeo del ILS, lo que obligó a elevar

los mínimos de visibilidad requeridos para aterrizajes, afectando directamente la regularidad de las operaciones aéreas (Cabrera, 2024).

Estas situaciones fueron reforzadas por IATA y Achila, quienes señalaron que aeropuertos como los de Copiapó, Osorno, Valdivia, Balmaceda y Punta Arenas también carecen de tecnología adecuada para operar bajo condiciones de baja visibilidad, situación que se agravó durante el invierno de 2024, calificado como uno de los más complejos por las aerolíneas nacionales. LATAM reportó 677 vuelos afectados, Jetsmart indicó que La Serena concentró el 55% de sus cancelaciones, y SKY registró 157 vuelos suspendidos, siendo La Serena y Puerto Montt los puntos más críticos (Dulanto, 2025).

Sumado a las restricciones tecnológicas, existen también limitaciones territoriales para la instalación del ILS. La Dirección General de Aeronáutica Civil (DGAC) señaló que se requiere disponer de terrenos adecuados para instalar todos los componentes del sistema, lo que puede implicar procesos de expropiación, a cargo del Ministerio de Obras Públicas (Equipo DF, 2025).

En este sentido, la expansión del aeropuerto La Florida enfrenta actualmente un conflicto con el trazado preliminar de la nueva Ruta 41 por By Pass, ya que esta atravesaría los terrenos necesarios para extender la pista, construir nueva infraestructura de rodaje e instalar el ILS. Aunque el proyecto vial se encuentra aún en etapa de diseño, el MOP ha señalado que se están gestionando las aprobaciones correspondientes y que ya es posible avanzar con las expropiaciones necesarias para su ejecución (Red Comunales, 2025).

En base a todas estas consideraciones, se reafirma que el sistema ILS tiene sus fallas por ejemplo en la senda de planeo y tiene restricciones como lo son sus áreas críticas ya que todo el emplazamiento es en nivel tierra. Además, su alto costo no permite poder implementar de forma rápida a todos los aeródromos del país.

El avance tecnológico ha permitido el desarrollo de sistemas más modernos de ayuda a la aproximación, como el GBAS. Este sistema supera al ILS en flexibilidad y precisión,

permitiendo múltiples maniobras simultáneas sin las restricciones de las áreas sensibles propias del ILS. Además, este sistema solo utiliza una estación de referencia terrestre, como se puede ver en la *Ilustración 1-1*, lo cual lo diferencia con el ILS, ya que, este sistema requiere de equipos específicos por pista.

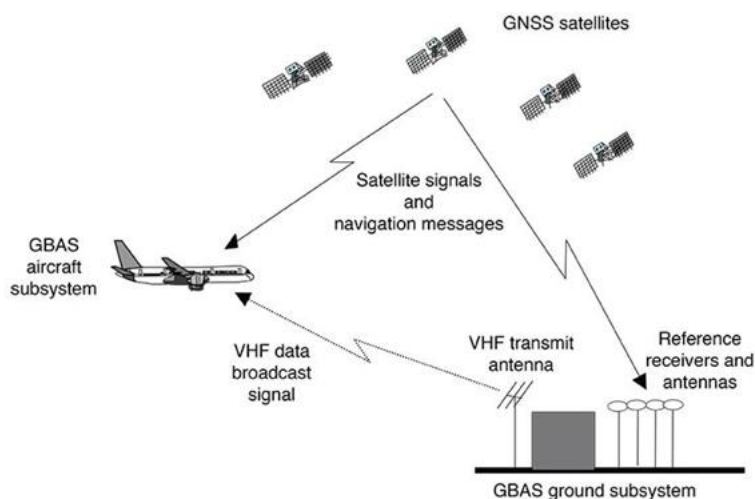


Ilustración 1-1: Flujo de información sistema GBAS.

Fuente: Estudio y análisis para la implantación de un sistema GBAS en el Aeropuerto de Gran Canaria, Jiménez, 2019.

En el ámbito de costos, se puede evidenciar en la *Tabla 1-1*, los costos totales de la instalación y mantenimiento del ILS versus con un sistema GBAS en el aeródromo de Viseu. Lo cual muestra una diferencia entre cada sistema, corroborando así la disminución de costos al implementar un sistema de aproximación por satélite.

Tabla 1-1: Costos totales de implementación de ILS CAT I y GBAS CAT I.

	ILS CAT I	GBAS CAT I
Costo total [€]	815.000	737.000

Fuente: A Comparative Study between ILS and GBAS Approaches: The Case of Viseu Airfield, December 2020.

En el ámbito medioambiental, la empresa INDRA, la cual ha diseñado y desplegado sistemas GBAS en múltiples aeropuertos, afirma que esta tecnología permite que las aeronaves realicen descensos más pronunciados, rápidos y cortos al tocar tierra, esto ayudando a

disminuir el consumo de combustible, reducir el ruido y las emisiones de dióxido de carbono a la atmósfera.

Otro sistema que se ha ido potenciando en la actualidad es el SBAS, el cual es un sistema de aumentación basado en satélites, el cual se asimila a las aproximaciones CAT I de un ILS, sin embargo, éste optimiza la aproximación final. Además, uno de los factores más ventajosos de este sistema es que es capaz de cubrir un continente completo colocando estaciones de referencia repartidas y utilizando satélites geoestacionarios. Este sistema ya es utilizado en gran parte del mundo, así como en Norte América, Corea, Europa, en donde en este último además lo utilizan para otros sectores industriales como el transporte o la agricultura.

Según Mireira Colina de *INDRA*, en el “Regional LATAM SBAS Virtual Workshop”, planteó que hay estudios en otras partes del mundo, que concluyen un ahorro de combustible entre un 3% y 5% en vuelos de largo alcance utilizando la tecnología SBAS. Además, se eliminarían los costos de mantenimiento e infraestructura del ILS con el tiempo, los cuales serían aproximadamente 100.000-200.000 \$US anuales y 1.000.000-2.000.000 \$US, respectivamente. Otro punto relevante utilizando este sistema es el ahorro en tiempo de vuelo, ya que, las aproximaciones se reducen entre 2 a 4 minutos.

Por lo que se considera relevante analizar la implementación de un sistema de aumentación de precisión a las aproximaciones para aportar a su evolución, aumentar la flexibilidad de las aeronaves en las aproximaciones, haciéndolas más eficientes y seguras. Además, “suponer un aumento de la capacidad de los aeropuertos de entre el 2% y el 6%” (*INDRA*, 2019), utilizando GBAS. Si no, por otro lado, mejorar el rendimiento del aeropuerto hasta en un 25% con SBAS, porcentaje presentado según Colina (2024) en el “Regional LATAM SBAS Virtual Workshop”.

1.2 Objetivos

Objetivo General

- Evaluar la viabilidad técnica y económica de los sistemas de navegación de aumentación de precisión para su implementación en la Red Aeroportuaria Nacional de Chile, con el fin de identificar la alternativa más acorde en términos de coberturas, limitaciones, costos y beneficios.

Objetivos Específicos

- Realizar un catastro de la Red Aeroportuaria Nacional en base al sistema de aproximación actualmente utilizado o el tipo de procedimiento de aproximación, con sus limitaciones.
- Comparar operacionalmente los tres sistemas de aproximación (ILS, GBAS y SBAS), para evidenciar sus ventajas y desventajas.
- Realizar un análisis aproximado de los costos y beneficios económicos vinculados a la implementación de estos sistemas de aumentación de precisión en Chile, para evidenciar el sistema más rentable en base a costos y cobertura.
- Determinar qué sistema de navegación de aumentación de precisión es más acorde para la Red Aeroportuaria del país, basándose en sus características, limitantes y el análisis de costos realizado.

1.3 Metodología y teoría a utilizar

La investigación busca analizar los beneficios y limitantes entre los sistemas GBAS y SBAS para proponer uno de éstos a los aeropuertos de Chile. En donde se analizan los aspectos técnicos, económicos y operativos de estas tecnologías para después evaluar el sistema más conveniente para la región. Para esto se ocupa una metodología de investigación exploratoria donde se realiza una investigación sobre cada sistema, sus características y su utilización en otras partes del mundo.

Posteriormente, se utiliza la información obtenida para la comparación entre ambas tecnologías de aproximación, en términos de beneficios para la aviación, incluso sus utilidades en otras industrias y sus limitaciones. Para esta comparativa se utiliza el Enfoque de Análisis de Decisiones Multicriterio (MCDM), y en particular su subcategoría MADM (Multi-Attribute Decision Making). Donde según Mpimis & et.al (2022) es adecuada para comparar un número finito de alternativas. Este enfoque permite evaluar distintas opciones a partir de múltiples criterios técnicos, mediante una escala ordinal de desempeño. Este método es ampliamente utilizado en ingeniería y gestión tecnológica cuando se requiere una comparación cualitativa estructurada, sin recurrir a ponderaciones complejas.

Con esto se analizan las características obtenidas para llegar a conclusiones acordes para proponer una alternativa de sistema de aumentación de la precisión para las aproximaciones de las aeronaves en Chile, cumpliendo los objetivos de este trabajo. Por lo tanto, en esta memoria se realiza una investigación tanto teórica como cuantitativa, además de la comparación con propuestas y/o proyectos relacionados a GBAS y SBAS alrededor del mundo. Esta metodología se puede visualizar en la *Ilustración 1-2*.

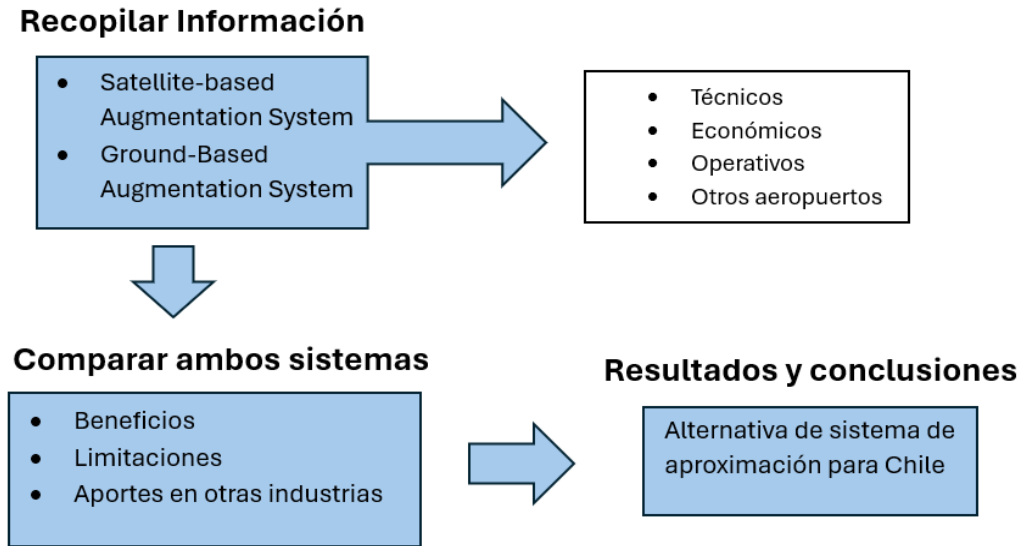


Ilustración 1-2: Esquema de la metodología a utilizar.

Fuente: Elaboración propia.

Además, este trabajo se sustenta bajo antecedentes teóricos de conceptos vistos en clases de Gestión del Espacio Aéreo, de la carrera de Ingeniería en Aviación Comercial Donde se aprendió sobre sistemas de precisión más avanzados como GBAS, SBAS, LNAV y los beneficios que traen consigo para el tránsito aéreo y las aproximaciones. También, del curso de Introducción a la Electrónica Aplicada en donde se estudió sobre ayudas a la navegación, como el ILS, sus componentes principales y sus categorías. Por otro lado, se utiliza como base información y datos obtenidos de la OACI, Thales Alenia Space y distintas entidades y/o empresas de la industria aeronáutica.

1.4 Alcance

El alcance de este trabajo tiene un carácter exploratorio, ya que el Ground Based Augmentation System (GBAS) y el Satellite Based Augmentation System (SBAS) son conceptos que no se han estudiado y/o analizado aún para su implementación en Chile, por lo que no se cuenta con antecedentes de utilización previos en el país, sin embargo, si hay información de su funcionamiento en el continente americano como también en el europeo. Es por esto por lo que se utilizarán antecedentes de aeropuertos de otros países que cuenten con GBAS o SBAS como sistema de ayuda a la aproximación. Este trabajo además es descriptivo, ya que, se centrará en la recolección de información relacionada, que impacten en esta propuesta de implantación, además de analizar el sistema utilizado actualmente.

Para evaluar la propuesta de implementar uno de estos sistemas, el levantamiento de información tiene un alcance de carácter mundial, específicamente en aeropuertos que ya cuenten con al menos uno de estos sistemas propuestos de ayuda a la aproximación. Como el aeropuerto de Málaga Costa del Sol o el aeropuerto de Frankfurt, que cuentan con GBAS, o continentes en donde se usa SBAS, como el europeo denominado European Geostationary Navigation Overlay Service (EGNOS) o el de Estados Unidos, el cual tiene por nombre Wide Area Augmentation System (WAAS).

En relación con los límites de tiempo del estudio, se investigarán informes, publicaciones, datos y páginas web publicados desde el año 2010 en adelante. En tanto, el caso aplicado está dirigido a Chile y sus aeropuertos/aeródromos.

Capítulo 2.

Estado del Arte

2 Estado del arte

2.1 Antecedentes

En este apartado se cubrirán antecedentes relacionados a cómo se conforma la Red Aeroportuaria Nacional, que tipo de procedimiento de aproximación utilizan actualmente los aeródromos del país y antecedentes relacionados al *Instrument Landing System (ILS)*, que asiste en el aterrizaje de aeronaves a 11 recintos aeroportuarios de Chile. Además, se analizarán documentos desde distintas bases de datos que contengan información relacionada a este estudio. Finalmente, se recopilaron antecedentes de aeropuertos que utilicen estos sistemas avanzados de ayuda a la aproximación como el SBAS o GBAS, que mejoran la precisión de navegación mediante tecnología satelital.

2.1.1 Red Aeroportuaria Nacional (RAN)

En Chile, “todos los aeropuertos y aeródromos del país forman parte de la Red Aeroportuaria Nacional, la cual es supervisada por la Dirección General de Aeronáutica Civil (DGAC)”. (Ministerio de Obras Públicas, 2025). Esta red está compuesta por un total de 312 instalaciones, entre aeródromos y aeropuertos.

Dentro de la red, se encuentra la Red Primaria, la cual está conformada por 17 recintos aeroportuarios, de los cuales 7 son aeropuertos y 10 son aeródromos, estos se distribuyen en 13 regiones. Esta red se caracteriza por ser la utilizada de manera frecuente por las grandes aerolíneas para el transporte de pasajeros y carga. “Abarcan aproximadamente el 99,5% de los pasajeros oficialmente registrados”. (Ministerio de Obras Públicas, Dirección de Aeropuertos, 2025)



Ilustración 2-1: Red primaria aeroportuaria nacional.

Fuente: Ministerio de Obras Públicas.

Otra clasificación es la Red Secundaria, la cual está conformada por 12 aeródromos que registran operaciones de pasajeros y carga en aeronaves de menor tamaño. “En conjunto, en estos aeródromos se efectúan aproximadamente 100 mil operaciones anuales.” (Ministerio de Obras Públicas, Dirección de Aeropuertos, 2025). Estos aeródromos se encuentran ubicados en 9 regiones del país, su principal objetivo es posibilitar la conectividad aérea entre ciudades ubicadas en zonas que no están suficientemente cubiertas por la red primaria.



2.1.2 Tipos de procedimientos de aproximación.

Los procedimientos de las aeronaves pueden ser instrumentales (IFR) o visuales (VFR). En Chile, los aeródromos que cuentan con procedimientos instrumentales tienen estas cartas de navegación publicadas en el Internet Flight Information Service (IFIS). Para los aterrizajes, existen las cartas de aproximación, las cuales son denominadas IAC.

Las cartillas IAC incluyen distintos tipos de procedimientos de aproximación autorizados, según la tecnología de navegación disponible. Entre los más comunes se encuentran los procedimientos PBN (RNP AR y RNP APCH), el ILS y las aproximaciones convencionales como VOR/DME. Todas éstas se definen a continuación.

Performance-Based Navigation (PBN): Es un concepto introducido por la International Civil Aviation Organization (ICAO) (2008) que define los requisitos de navegación en función del rendimiento que una aeronave debe ser capaz de cumplir, más que del equipamiento específico que utilice. A diferencia de los sistemas convencionales basados en ayudas terrestres, PBN se apoya principalmente en sistemas GNSS (como el GPS), permitiendo diseñar rutas y procedimientos según criterios de precisión, integridad, continuidad y funcionalidad requeridos para cada fase del vuelo.

PBN se estructura en dos componentes principales:

RNAV (Area Navigation): Según Federal Aviation Administration (2024) es una forma de navegación que permite a la aeronave volar por cualquier trayectoria dentro de una red de rutas, usando referencias como GNSS, DME, etc., sin depender de ayudas terrestres directamente alineadas

RNP (Required Navigation Performance): “RNP es un conjunto de especificaciones dentro del marco PBN que permite a una aeronave volar siguiendo una trayectoria precisa con un alto nivel de exactitud e integridad, e incluye monitoreo a bordo del desempeño y alertamiento en caso de degradación del mismo.” (SKYbrary Aviation Safety).

Donde dentro de los procedimientos RNP, se especifican dos tipos diferentes:

- **RNP APCH (Required Navigation Performance Approach):** Es un procedimiento que está diseñado para mejorar la precisión de las aproximaciones instrumentales mediante el uso de navegación RNAV basada en GNSS. Contribuyen a mejorar la seguridad y la eficiencia operacional, permitiendo aproximaciones estabilizadas incluso en aeródromos sin ayudas terrestres convencionales.

Este tipo de aproximación puede tener dos casos particulares, según ICAO:

- **LNAV/VNAV (Lateral and Vertical Navigation):** Incluye guía lateral por GNSS y guía vertical gestionada a través de un altímetro barométrico (BARO/VNAV). Este tipo permite realizar un descenso continuo y se asocia a mínimos de tipo DA (Decision Altitude).
 - **LNAV only (Lateral Navigation):** Utiliza guía lateral basada en GNSS, sin guía vertical. El descenso se realiza siguiendo mínimos de tipo MDA (Minimum Descent Altitude).
- **RNP AR (Required Navigation Performance Authorization Required):** Es el procedimiento RNP más sofisticado. Requiere una autorización específica del Estado y que tanto la aeronave como la tripulación cumplan requisitos adicionales. Este tipo de aproximación incluye guías LNAV/VNAV, utilizando guía vertical basada en el altímetro barométrico (BARO/VNAV). Permite una navegación lateral y vertical de alta precisión, mejorando la seguridad operacional.

Instrument Landing System (ILS): Sistema utilizado para asistir a las aeronaves con una aproximación de precisión e instrumental, que brinda guía vertical y lateral. Su CAT I permite aterrizar con una altura de decisión (DA) hasta de 200 ft. La CAT IIIB permite descender a una altura de decisión no inferior a 50 ft.

VOR/DME: Procedimiento de aproximación de no precisión, es un sistema de navegación basado en tierra que ayuda a los pilotos a identificar su ubicación relativa respecto a una estación específica. Estas estaciones emiten radiales, que son líneas imaginarias que parten desde el VOR hacia el exterior. El DME (Equipo de Medición de Distancia) funciona enviando señales desde el avión hacia el equipo en tierra, que las devuelve al avión. Al medir el tiempo transcurrido entre la emisión y la recepción de las señales, el sistema de a bordo calcula con exactitud la distancia al punto de referencia.

Si el aeródromo no cuenta con su procedimiento en el IFIS, quiere decir que no existe un procedimiento instrumental para aquél aeródromo y solo puede operar mediante **vuelos VFR**. Estos se realizan de forma que la aeronave vuele en condiciones de visibilidad y de distancia de las nubes que sean iguales o superiores a las indicadas por el *ENR 1.2 Reglas de vuelo visual* del IFIS.

2.1.3 Antecedentes del Instrument Landing System.

Tal como se ha mencionado anteriormente, el *Instrument Landing System* es el sistema utilizado para asistir a las aeronaves con una aproximación de precisión e instrumental, que brinda guía vertical y horizontal para las aeronaves poder aterrizar a la pista en algunos aeropuertos y aeródromos en Chile.

El sistema ILS requiere dos zonas protegidas: el área crítica, donde se prohíbe todo movimiento durante la aproximación, y el área sensible, con tránsito regulado. Sus dimensiones varían según la categoría del ILS.

Sumado a contar con estas áreas protegidas, la autoridad DGAC Chile señaló que “la operación de los equipos ILS requiere contar con terrenos para la instalación de todos los componentes del sistema, lo que significa que, en algunos casos, deban realizarse expropiaciones de terrenos, tarea que es propia del Ministerio de Obras Públicas (MOP)” (Equipo DF, 2025).

Con relación a lo señalado en el párrafo precedente, se tiene el Aeropuerto La Florida, ubicado al Norte de Chile, específicamente en la ciudad de La Serena, el cual según la JAC es el séptimo aeropuerto a nivel nacional con mayor cantidad de operaciones del año 2024 (18.710 operaciones). Este aeropuerto se enfrenta a un conflicto territorial con el nuevo trazado de la Ruta 41 por By pass. Según lo informado por Red Comunales (2025) en *El Serenense*, el diseño preliminar del camino atravesaría los terrenos ubicados al oriente de la pista, los mismos que se requieren para extenderla de 2.000 a 3.800 metros, construir una losa de rodaje y modernizar los sistemas de navegación aérea, incluyendo la instalación del ILS. Aunque el trazado vial aún está en etapa preliminar, el director nacional de Concesiones del MOP, Juan Manuel Sánchez, indicó que se gestionan aprobaciones previas y que ya es posible iniciar expropiaciones, gracias a las facultades legales.

En los siguientes párrafos se describen situaciones imprevistas que han ocurrido últimamente con el ILS en Chile.

El Aeródromo de La Florida, ubicado en la ciudad de La Serena, sufrió atrasos reiterados el año 2024 por no contar con un sistema de aproximación con tecnología suficiente para cubrir problemas de visibilidad y/o niebla, “entre el 22 de mayo y el 7 de julio, se cancelaron 98 vuelos que debían aterrizar o despegar desde el aeródromo de la serena, principalmente, a situaciones climáticas” (Diario La región de Coquimbo, 2024). Esto ocurre con mayor frecuencia ya que no cuenta con ILS que le permita al piloto aproximarse con menor visibilidad.

Por otro lado, en julio del año 2024, “un sistema de aterrizaje desactualizado y con un problema en sus antenas tienen reducida la capacidad del Aeropuerto El Tepual en Puerto Montt” (Cabrera, 2024). En esta ocasión, la senda de planeo del ILS no se encontraba funcionando correctamente, por ende, ha hecho subir la visibilidad mínima para aterrizar, donde normalmente con su categoría I podría aproximar con un mínimo de 500 m, tuvo que aumentar el mínimo a una visibilidad de 700 m, complicando los despegues y aterrizajes de este aeropuerto. Este problema es común en el sistema ILS, ya que al estar en tierra se

encuentra afecto a que sea interferido en su área crítica, también, las aeronaves o automóviles generan disturbios en la señal ILS, causando errores en la senda de planeo.

En el año 2025, ha destacado el aeródromo de La Florida, ya que hay una expansión planificada y es uno de los recintos que no cuenta con un sistema de aproximación.

Según Varela (2025), como parte del plan de modernización del aeropuerto de La Serena, se contempla la construcción de dos puentes de embarque, la instalación de tres cintas transportadoras de equipaje, cuatro máquinas de revisión y 16 counters para aerolíneas. No obstante, diversas autoridades y representantes gremiales coinciden en que es fundamental incorporar tecnología de aterrizaje por instrumentos (ILS) para enfrentar adecuadamente condiciones meteorológicas adversas como la nubosidad o la vaguada costera, y así evitar cancelaciones de vuelos.

En esa línea, Guerrero subraya la importancia de instalar un sistema ILS que permita operar bajo condiciones de baja visibilidad y también mejorar el acceso vial al aeropuerto. Esta visión es compartida por el presidente de la Multigremial, Marco Carrasco, quien señala que "equipar el aeropuerto con más mangas —al menos tres o cuatro— y con tecnología de aterrizaje instrumental (ILS de última generación) es fundamental para que La Serena opere sin interrupciones". Por su parte, la alcaldesa Daniela Norambuena destaca que “La Serena es actualmente la tercera comuna del país con mayor flujo de pasajeros”, lo que reafirma la necesidad de una inversión integral que contemple no solo más puentes de embarque, sino también una infraestructura moderna, eficiente y proyectada para el crecimiento futuro del turismo y la conectividad regional.

Según lo reportado por Dulanto (2025) en el *Diario Financiero*, IATA y Achila señalaron que los aeropuertos de Copiapó, La Serena, Osorno, Puerto Montt, Valdivia, Balmaceda y Punta Arenas no cuentan con tecnología adecuada para operar con baja visibilidad, lo que genera importantes desafíos operacionales en condiciones meteorológicas adversas. Esta situación fue especialmente crítica durante el invierno de 2024, el cual fue calificado por

algunas aerolíneas como el peor de los últimos años debido al alto número de vuelos cancelados o demorados en estos terminales.

Las tres principales aerolíneas del país reportaron impactos significativos. LATAM registró 677 vuelos afectados, lo que perjudicó a más de 99 mil pasajeros. Jetsmart indicó que el aeropuerto La Florida, en La Serena, concentró el 55% de sus cancelaciones en 2024. SKY Airline, por su parte, informó 157 vuelos cancelados entre mayo y agosto, de los cuales 51 correspondieron a los aeropuertos de La Serena y Puerto Montt. En este último, la situación se agravó desde junio por la inactividad del sistema ILS, afectando a más de 6.100 pasajeros. Las aerolíneas coincidieron en que estas afectaciones responden, en gran parte, a limitaciones de infraestructura aeroportuaria y recalcaron la importancia de avanzar en mejoras técnicas, como la implementación de sistemas ILS, para asegurar una operación más resiliente frente a condiciones climáticas desfavorables.

Además, según (AIP-CHILE, 2024), también existen aeródromos fuera de la red primaria que no cuentan con ILS, como lo son el aeródromo María Dolores en Los Ángeles, el ad. General Bernardo O'Higgins en Chillán, aeródromo General Freire de Curicó, en Natales el ad. Tte. Julio Gallardo, aeródromo Guardiamarina Zañartu en Puerto Williams y el ad. Teniente Rodolfo Marsh, ubicado en la Antártica. Estos solo cuentan con procedimientos RNAV (LNAV only), el cual entrega una aproximación de no precisión y otros solo pueden aterrizar de forma visual. Todos estos aeródromos se encuentran en la zona centro-sur y austral del país, donde la meteorología es relevante y cambiante por las bajas temperaturas.

Estos antecedentes demuestran que sería de gran ayuda la implementación de una tecnología de aproximación instrumental en aeropuertos y aeródromos nacionales que no cuenten con ILS, garantizando seguridad, eficiencia y continuidad operativa en un contexto climático desafiante.

2.1.4 Investigación de nuevos sistemas de aumentación de precisión para la aproximación.

Para avanzar con esta investigación, se buscó información en distintas bases de datos sobre los dos sistemas planteados (SBAS y GBAS) con el fin de averiguar si existen investigaciones pasadas y/o si se ha realizado la comparación entre ambos sistemas anteriormente.

En la *Tabla 2-1* se resume el número de publicaciones encontradas en las bases de datos desde el año 2014 hasta el 2024. Se buscó “*Satellite Based Augmentation System*”, “*Gbas aviation*” y además de sí existen documentos comparándolos, “*SBAS and GBAS*”. Esto dentro de las bases de datos *Web of Science*, *Scopus* y *Science Direct*.

Tabla 2-1: Número de publicaciones encontradas sobre SBAS y GBAS en distintas bases de datos, desde 2014 a 2024.

Frase buscada \ Bases de datos	Nº de publicaciones		
	Web of Science	Scopus	Science Direct
"Satellite Based Augmentation System aviation"	337	198	640
"Gbas aviation"	180	194	144
"SBAS and GBAS"	119	165	163
Total	636	557	947

Fuente: Elaboración propia, información obtenida de cada base de datos.

En general, se evidencia una escasa cantidad de publicaciones con respecto a los sistemas de aproximación, esto en comparación con la *Ilustración 2-4* que muestra la cantidad de publicaciones del tema “*Aviation approach*”, al ser un concepto más general se evidencia mayor estudio al superar en magnitud a las frases de la *Tabla 2-1*.

10,326 results from Web of Science Core Collection for:

Aviation approach (All Fields)



Ilustración 2-4: Búsqueda de número de publicaciones con la frase "aviation approach".

Fuente: Web of Science.

En el *Gráfico 2-1*, se realiza la distribución de publicaciones por año para mostrar de forma gráfica la evolución de estos conceptos, considerando publicaciones desde el 2014 hasta el 2024, por cada una de las bases de datos. En donde se evidencia que en la plataforma *Web of Science* existe una reducida cantidad de documentos entre los años 2022 y 2024, incluso no existen comparaciones en los años 2023 y 2024 entre SBAS y GBAS.

Generalmente, en los tres gráficos que se muestran a continuación, existe una mayor cantidad de publicaciones del “Satellite Based Augmentation System” que del GBAS y de su comparativa. En el *Gráfico 2-1*, se evidencia que desde el 2020 estos conceptos tienen una menor cantidad de documentos e información, notando una mayor disminución con los artículos relacionados a GBAS. Para el *Gráfico 2-2*, desde 2014 a 2019 las tres bases de datos contenían una cantidad similar de publicaciones por cada concepto, sin embargo, desde el 2020 se evidencia una tendencia de artículos sobre SBAS por sobre los demás, esto mismo ocurre en el *Gráfico 2-3*, pero para todos los años (2014 a 2024). Por lo cual, se puede concluir que mayoritariamente hay una tendencia a escribir más información sobre el sistema SBAS por sobre el GBAS. Además, existe en una menor cantidad publicaciones que vinculan los dos conceptos y/o los comparen.

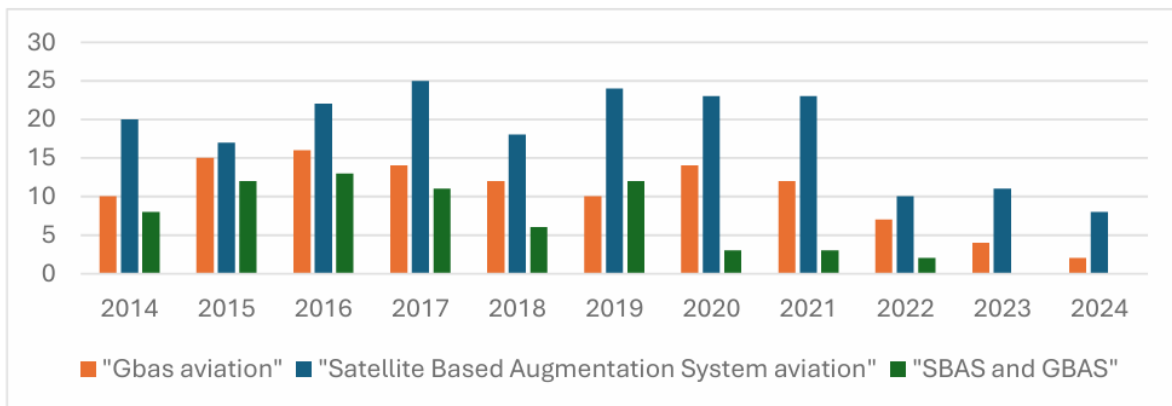


Gráfico 2-1: Número de publicaciones desde 2014 a 2024 por cada frase en Web of Science.

Fuente: Elaboración propia, información obtenida de la base de datos Web of Science.

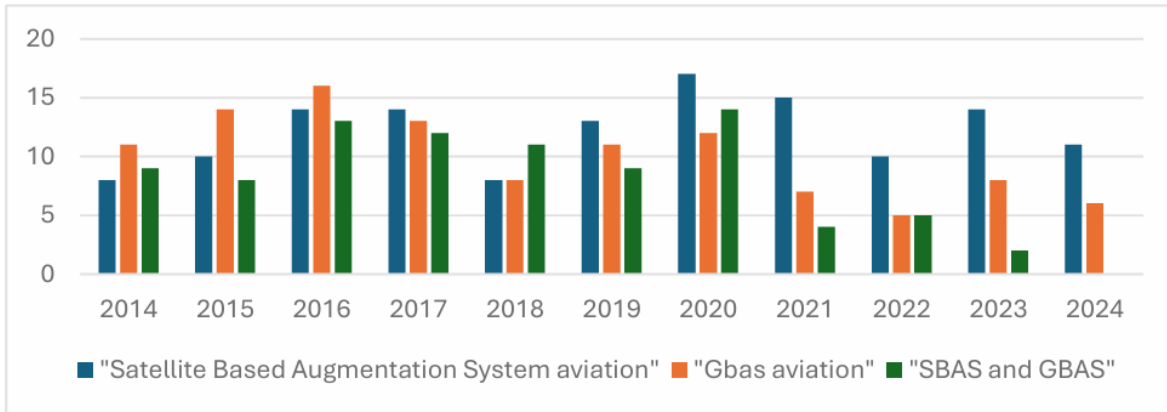


Gráfico 2-2: Número de publicaciones desde 2014 a 2024 por cada frase en Scopus.

Fuente: Elaboración propia, información obtenida de la base de datos Scopus.

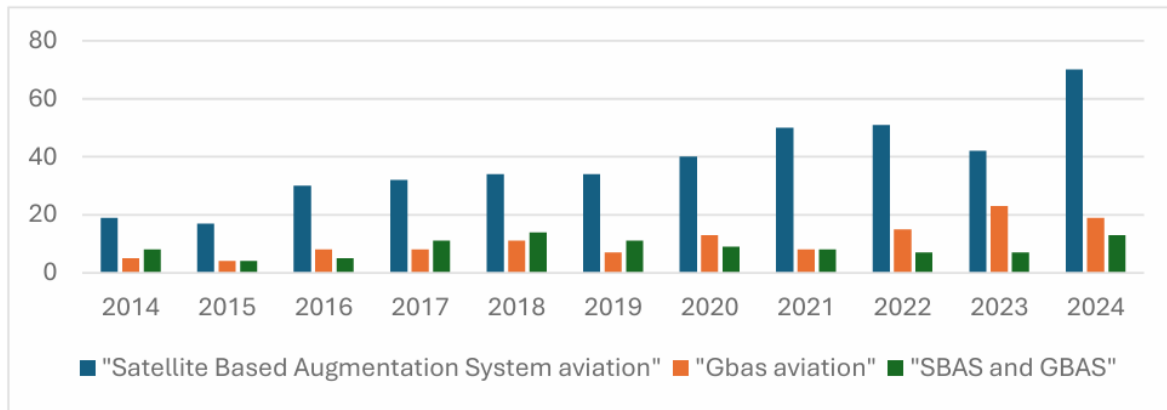


Gráfico 2-3: Número de publicaciones desde 2014 a 2024 por frase en Science Direct.

Fuente: Elaboración propia, información obtenida de la base de datos Science Direct.

Con relación a las publicaciones encontradas, se destacan las cuales complementan la información de este estudio. A continuación, se evidencia un resumen de la información relevante de cada publicación destacada y su ayuda a la investigación.

Según Dautermann & et.al (2015), los procedimientos de aproximación avanzados, como LPV con SBAS y RNP, mejoran la precisión y disponibilidad en aeropuertos, reducen el impacto en espacio aéreo extranjero y minimizan el ruido.

Por otro lado, según lo escrito por Krasuski & et.al (2020), señala que los sistemas SBAS mejoran el posicionamiento en la aviación, garantizando precisión, integridad, continuidad y

disponibilidad. Destacan EGNOS (Europa), WAAS (EE. UU.), MSAS (Japón), GAGAN (India), SDCM (Rusia) y ASAS (África). En Polonia, EGNOS se usa para aproximaciones SBAS APV-I y APV-II, con requisitos específicos según el tipo de operación. Además de su aplicación en aviación, EGNOS ha sido evaluado para navegación y transporte, incluyendo precisión en aproximaciones LPV 200, navegación RNAV y comparación con sistemas como el ILS.

Otra publicación que contiene información relevante sobre los sistemas de aumentación de la precisión es de Kovar & et.al (2023), donde plantea que existen diversos sistemas de navegación para aproximación y aterrizaje, desde aproximaciones sin precisión hasta aterrizajes automatizados en condiciones de baja visibilidad (LVC). Los sistemas terrestres como ILS y GBAS soportan LVC, **pero su alto costo los hace inviables** para aeropuertos pequeños y medianos, que suelen limitarse a mínimos operativos CAT I. Los sistemas SBAS con LPV 200 ofrecen una alternativa más accesible, pero también están restringidos a CAT I, dejando muchos aeropuertos inaccesibles en LVC, lo que genera desvíos, retrasos y altos costos, estimados en hasta 100.000 euros por vuelo en regiones como Polonia. Para mejorar la accesibilidad en LVC, se propone un concepto SBAS para operaciones CAT II, desarrollado por Honeywell dentro del programa SESAR 2020.

El estudio de Jeong & et.al (2016) compara los sistemas de aproximación ILS y GLS (GBAS/SBAS) en precisión lateral y vertical mediante pruebas de vuelo con aeronaves de inspección. El ILS presenta un error de desviación lateral y vertical de ± 20 m a 18 NM del umbral de la pista, reduciéndose a ± 5 m cerca del umbral. En contraste, el GLS muestra mayor estabilidad con errores inferiores a $\pm 0,5$ m (lateral) y ± 2 m (vertical) en toda la sección desde el umbral hasta 18 NM. Ambos cumplen los criterios de precisión CAT-I de la FAA. El GBAS, al ser más preciso y estable, permite trayectorias de vuelo más cortas y estables, optimizando el consumo de combustible en aproximaciones y aterrizaje.

Todas estas publicaciones mencionadas bajadas desde las distintas bases de datos aportan un sustento científico a esta investigación. Además, se evidencia que las cuatro publicaciones tienen en común que en su escrito señalan que estos sistemas sea SBAS o GBAS aportan

precisión y estabilidad a las aproximaciones. Otro elemento por destacar es que Kovar & et.al (2023) afirma que el ILS y el sistema GBAS tienen costos bastante elevados, en cambio el sistema SBAS es más accesible. Sobre el estudio de Jeong & et.al (2016), se destaca que, en las pruebas de vuelo realizadas, el ILS presentó errores de desviación en cambio con aproximaciones GLS los errores fueron inferiores en ± 15 m.

2.1.5 Infraestructura de sistema GBAS en otros aeropuertos.

En este apartado se visualizan distintos aeropuertos en el mundo que ya tienen implementado un sistema GBAS en alguno de sus aeropuertos. Además, se plasma la infraestructura necesaria para que el aeropuerto pueda contar con GBAS.

Aeropuerto de Málaga – Costa del Sol. Málaga (España).

El Aeropuerto de Málaga-Costa del Sol cerró 2023 con más de 22,3 millones de pasajeros y 161.684 vuelos (AENA,2024). Este aeropuerto es similar a AMB con relación a capacidad de pasajeros al igual que en número de pistas (2), sin embargo, estas no son paralelas como las pistas de Arturo Merino Benítez. La pista que se encuentra en la parte superior de la *Ilustración 2-2* es la 13/31 y la otra es la 12/30.

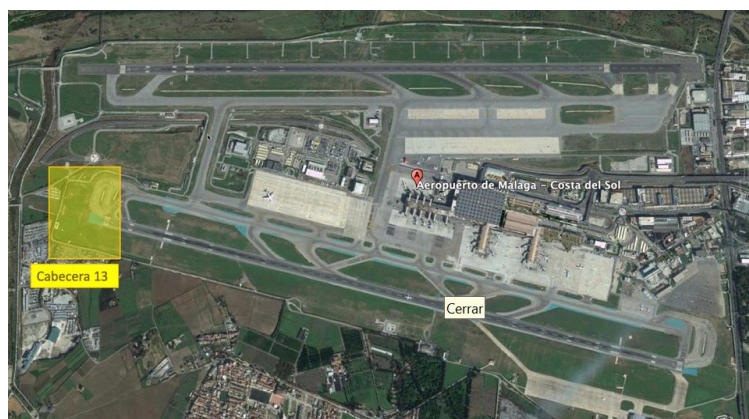


Ilustración 2-5: Aeropuerto de Málaga Costa del sol, desde vista aérea.

Fuente: Estudio y análisis para la implantación de un sistema GBAS en el Aeropuerto de Gran Canaria, Jiménez, 2019.

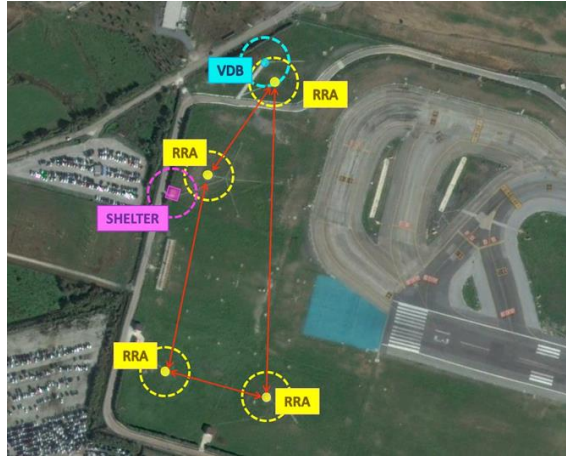


Ilustración 2-6: Antenas y estación del sistema GBAS en Aeropuerto Costa del Sol.

Fuente: Estudio y análisis para la implantación de un sistema GBAS en el Aeropuerto de Gran Canaria, Jiménez, 2019.

En la *Ilustración 2-6* se evidencia la poca simetría en la ubicación de las antenas RRA. Esto se debe a que se han colocado lo más lejos posible de las zonas de movimiento de aeronaves, como calles de rodaje, apartaderos de espera y la pista. De esta manera, las antenas se sitúan cerca del vial perimetral del aeropuerto, a pesar de esto los vehículos no interfieren en la señal. También se observa que la antena VDB y la estación están separadas entre sí, con la antena VDB ubicada cerca de una de las antenas RRA. Esta proximidad no genera problemas de interferencia, ya que la antena VDB opera en la banda de frecuencias VHF (30-300 MHz), mientras que las antenas RRA utilizan la señal L1 del GPS. La superficie total que ocupa este sistema terrestre es de un aproximado de 25.000 m².

Aeropuerto Internacional de Sídney-Kingsford Smith.

El Aeropuerto de Sídney Kingsford Smith (SYD) finalizó 2023 con su mayor número de pasajeros desde 2019, después de que 38,6 millones de viajeros pasaran por sus terminales (Aeropuerto de Sydney). Este aeropuerto tiene una configuración de 3 pistas, la 16R/34L que es la pista horizontal en la parte superior de la *Ilustración 2-7* y su paralela la 16L/34R. La tercera pista se aprecia con orientación vertical, siendo la 7/25. SYD solo tiene como similitud las pistas paralelas con SCEL.

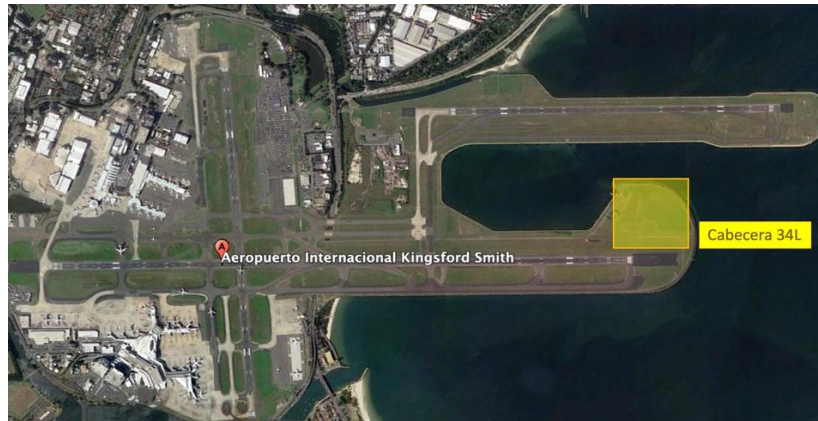


Ilustración 2-7: Aeropuerto SYD mirado desde arriba.

Fuente: Estudio y análisis para la implantación de un sistema GBAS en el Aeropuerto de Gran Canaria, Jiménez, 2019.

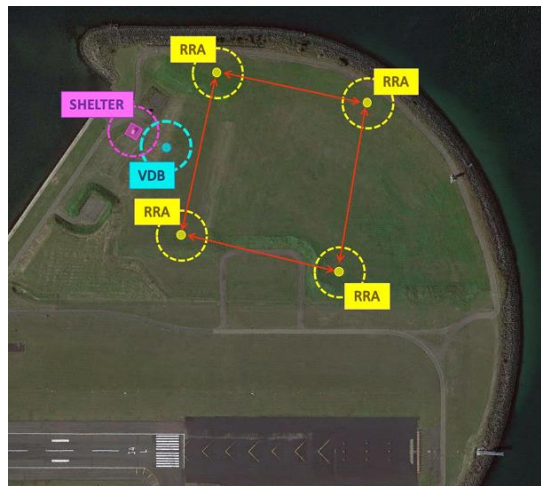


Ilustración 2-8: Configuración de antenas y estación del sistema GBAS.

Fuente: Estudio y análisis para la implantación de un sistema GBAS en el Aeropuerto de Gran Canaria, Jiménez, 2019.

El subsistema terrestre del GBAS en la *Ilustración 2-8* está ubicado solamente en una zona cerca del cabezal 34L, en un lugar sin ningún obstáculo, tiene una amplia extensión de terreno en esta área, alejada de las rutas de rodaje de las aeronaves. Como se muestra, las cuatro antenas RRA están dispuestas en un cuadrilátero, lo que representa la configuración más efectiva desde un punto de vista operativo, ya que así no dificulta el cableado interno. Sin embargo, esta configuración ideal no siempre es posible debido a la distribución del aeropuerto y la topografía del terreno. Por otro lado, la antena VDB y el refugio están situados muy cerca uno del otro. Esta proximidad facilita el mantenimiento de la antena y asegura un correcto funcionamiento del sistema.

Área Amplia), operado por la FAA. WAAS proporciona mayor precisión del GPS y cobertura en EE. UU., partes de Canadá, México y el Caribe. WAAS permite aproximaciones LPV y LNAV/VNAV en aeropuertos que carecen de ILS en tierra, mejora la eficiencia del espacio aéreo y aumenta la seguridad en condiciones de baja visibilidad o en islas remotas.

- **MSAS:** Su funcionamiento es desde 2007. Proporciona servicio LNAV y LPV. Presta servicios de aproximación satelital a **Japón** y sus alrededores.

- **EGNOS:** Su puesta en marcha en la aviación fue en marzo de 2011. Le brinda servicios a **Europa** y a países que estén en su entorno con acuerdos de la Unión Europea. “En la aviación, EGNOS permite aproximaciones precisas a los aeropuertos sin necesidad de sistemas de guía en tierra y ayuda a optimizar las rutas y las altitudes para acortar los tiempos de vuelo, reduciendo así el consumo de combustible y las emisiones de CO2.” (Thales Alenia Space, 2024). Además, la *EUSPA*; el programa espacial de la UE que gestiona EGNOS, en su página web aclara que este sistema no solamente sirve para la aviación, sino que también aporta una ayuda adicional de precisión a sectores como la agricultura, flota de vehículos, la geodesia, entre otros. Este SBAS fue implementado por *Thales Alenia Space*.

- **GAGAN:** Presta servicios de SBAS a la India y sus alrededores desde 2015. Admite todo tipo de operaciones APV-I. Se publicaron 8 LPV que prestan servicio a 5 aeropuertos.

- **KAAS:** “El segundo sistema SBAS desarrollado por *Thales Alenia Space*, se deriva de EGNOS, el Sistema Europeo de Navegación por Complemento Geoestacionario. Está diseñado para optimizar el posicionamiento y el rendimiento de navegación de la constelación GPS existente e incluye actualizaciones compatibles con las constelaciones Galileo y KPS (Sistema Coreano de Posicionamiento). KASS reducirá los errores de posicionamiento GPS a aproximadamente 1 metro de los 15 a 33 metros actuales para garantizar la precisión de la geolocalización en todo el país. Más

adelante, la República de Corea ampliará sus servicios a otras aplicaciones, como la seguridad pública, el transporte por carretera, el transporte marítimo y la ciencia.” (Thales Alenia Space, 2024). Este sistema le brinda servicios a **Corea** y sus alrededores.

- **ANGA:** “La AUC, en colaboración con la CAFAC, la OACI y otras partes interesadas clave, encargó un análisis de costos operativos (CBA) de dos fases para evaluar la viabilidad de implementar el SBAS en toda África. Los dos estudios fueron financiados a través del programa de apoyo a África de la UE. El proyecto se alinea con la Agenda 2063¹, la Estrategia Africana de Navegación Aérea y la SAATM. 4. Ambos CBA confirmaron que SBAS es económica y operativamente viable”. (Danga, 2025). Este sistema “tiene como objetivo proporcionar servicios de aumento basados en satélites (SBAS) en toda la región de **África y el Océano Índico** (AFI). Estos servicios aumentan el rendimiento de posicionamiento de la constelación GPS. La precisión, hasta el orden de un metro, la integridad, la disponibilidad y la continuidad de los servicios de posicionamiento se mejoran y garantizan para las aplicaciones de navegación por satélite más avanzadas, especialmente aquellas críticas en términos de seguridad.” (Thales Alenia Space, 2023).

Como se puede evidenciar, alrededor del mundo cada continente cuenta con un sistema de aumentación GNSS SBAS o está en proceso de adquirirlo (África). Cada continente eligió la gobernanza del sistema y cómo realizar la prestación del servicio, por lo cual es crucial la organización de todos los Stakeholders. Por esto que para que las aproximaciones LPV, con SBAS, puedan ser consideradas la aproximación más utilizada globalmente, es necesario que Sudamérica y Centroamérica comiencen a realizar un plan de implementación SBAS para toda la región.

¹ La AGENDA 2063 es el plan maestro y la estrategia de África para transformarla en la potencia mundial del futuro. Es el marco estratégico del continente que busca alcanzar su objetivo de desarrollo inclusivo y sostenible, y es una manifestación concreta del impulso panafricano hacia la unidad, la autodeterminación, la libertad, el progreso y la prosperidad colectiva, impulsados por el panafricanismo y el renacimiento africano. No solo resume las aspiraciones de África para el futuro, sino que también identifica programas emblemáticos clave que pueden impulsar el crecimiento económico y el desarrollo de África y conducir a la rápida transformación del continente. (African Union, 2025).

2.2 Marco teórico

Se comenzará cubriendo la definición y concepto del *Instrument Landing System*, luego *Ground Based Augmentation System* y del *Satellite Based Augmentation System*, detallando sus características principales. También, se documentará la infraestructura necesaria para la implementación de un sistema GBAS y SBAS, reconociendo los satélites y estaciones que requieren. Además de las limitantes que tengan estos sistemas de aumentación del GNSS.

2.2.1 Concepto ILS

El Instrumental Landing System (ILS), es un sistema de aterrizaje de precisión por instrumentos el cual permite que la aeronave sea guiada con precisión hacia la pista, tanto con guía lateral como vertical.

Este sistema está compuesto principalmente por 3 componentes que se pueden visualizar en la *Ilustración 2-10*, con sus respectivos números identificando cada componente.

El Localizador (1), entrega una guía lateral generalmente alineada al eje de pista, encontrándose al final de la pista. El Glide Slope o senda de planeo (2), proporciona la guía vertical a la aeronave mediante una senda de planeo con un descenso estándar de 3°. Los marcadores (3) y (4), entregan la posición de la aeronave durante la aproximación.

“El sistema ILS lo forman principalmente dos cosas: el localizador, y la senda de planeo. Opcionalmente puede constar de un DME. Como añadido, podemos tener unas balizas (OM, MM, IM) con las que en ausencia del DME sabremos nuestra distancia a la pista. El localizador nos guiará a través del plano horizontal mientras que la senda de planeo lo hará en el plano vertical. En caso de disponer de un DME, nos indicará la distancia a la pista.” (Medina, 2011)

Este sistema ofrece tres tipos de categorías, las cuales se diferencian por la altura mínima de decisión. Estas categorías son las siguientes:

- CAT I: Las aeronaves pueden aterrizar a una altura mínima de decisión mayor de 200 [ft]. RVR mayor de 550 [m].
- CAT II: Altura mínima de hasta 100 [ft]. RVR mayor de 300 [m] para aviones tipo A, B y C. RVR mayor de 350 [m] para aviones tipo D.
- CAT III: se compone por 3 categorías:
 - CAT IIIA, altura mínima por debajo de 100 [ft]. RVR mayor de 200 [m].
 - CAT IIIB, altura mínima por debajo de 50 [ft]. RVR mayor de 75 [m].
 - CAT IIIC, sin altura mínima. Sin RVR requerida.

A continuación, se detalla la infraestructura del sistema ILS y sus características, basándose en el contenido descrito por Federico Balbo en el documento “Instrument Landyng System” para IVAO Argentina.

La antena del Localizador está posicionada aproximadamente a unos 300 m detrás del otro extremo de la pista e idealmente transmite a lo largo del eje de pista (runway centerline). En algunos aeropuertos, esto puede no ser posible debido a obstáculos topográficos y por esta misma razón se utilizará un “offset localizer”, es decir, un localizador que transmite una señal de azimut no alineada al eje de pista. En el caso de que el Localizador este “offset”, estará debidamente indicado en la carta de aproximación instrumental.

La antena de Glide Slope está posicionada de lado a la pista, a la altura de la TDZ (Touch Down Zone). Típicamente a unos 300 m dentro de la pista partiendo desde la cabecera y a unos 120 m del eje de pista.

La señal del localizador se transmite en la banda VHF en frecuencias entre 108 y 112 MHz. Este rango de frecuencias es el mismo utilizado por los VOR, por esta razón solo las décimas impares (más 50 kHz) se utilizan para los ILS.

La señal del localizador está compuesta por dos lóbulos polarizados horizontalmente transmitidos en la misma frecuencia VHF, pero con diferente modulación de amplitud (AM).

Para una aeronave aproximando en un localizador, el lóbulo de izquierda resultará modulado a 90 Hz y el de la derecha a 150 Hz.

La aguja del localizador se desplaza a la derecha o a la izquierda en base a la cantidad de señal modulada recibida. Por ejemplo, si un avión aproximando en el localizador se encuentra a la derecha del eje de pista, la señal predominante será la de 150 Hz, por ende, la aguja resultará desplazarse hacia la izquierda. Si el avión se encuentra en el eje de pista, las señales de 90 Hz y de 150 Hz serán recibidas de manera pareja y la aguja quedará centrada

La posición de la aguja responde de manera similar al desvío desde la senda deseada. Si la aeronave se encuentra por debajo de la senda, la aguja estará por encima del centro del instrumento. El máximo de desviación de la escala es de 0.7° .

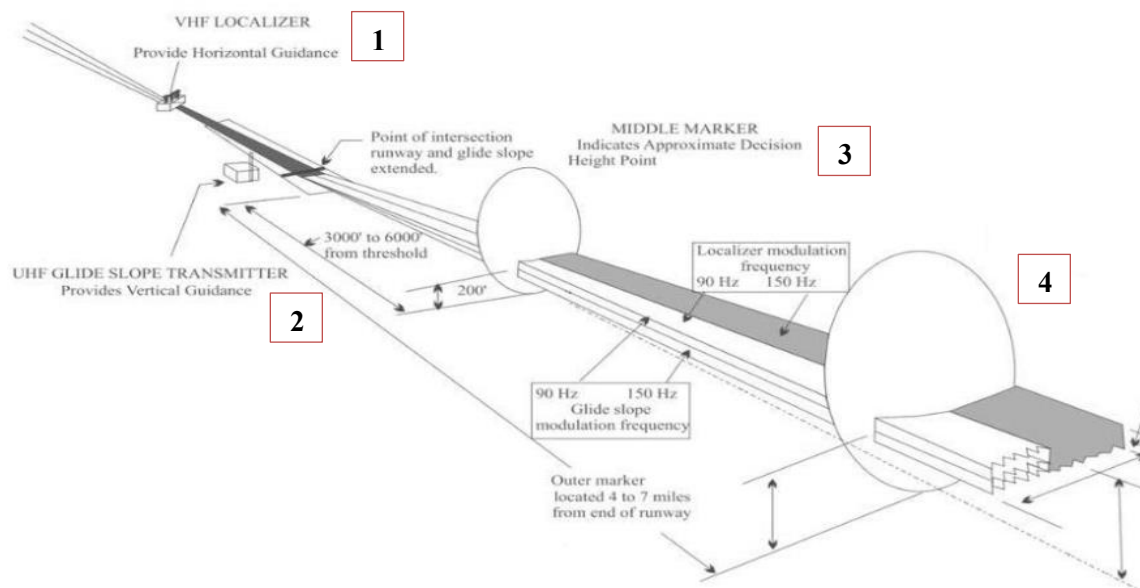


Ilustración 2-10: Sistema ILS con sus componentes de localizador y senda de planeo.

Fuente: Grupo One Air.

Áreas protegidas.

Este sistema al ser una instalación en tierra requiere áreas protegidas cerca de cada localizador y antena de pendiente de planeo, para que su funcionamiento no se vea afectado por interferencias de señal por parte de vehículos y/o aeronaves. Las siguientes definiciones de estas áreas son descritas por la DGAC Chile en la DAP 11 132:

ÁREA CRÍTICA ILS. Área de dimensiones definidas que rodea a las antenas del localizador y de la trayectoria de planeo en la cual se excluye la entrada y circulación de vehículos, incluso aeronaves, durante las operaciones ILS. Se protege el área crítica debido a que la presencia dentro de sus límites de vehículos y/o aeronaves ocasionaría perturbaciones inaceptables de la señal en el espacio ILS.

ÁREA SENSIBLE ILS. Área en la cual se controla el estacionamiento y/o movimiento de vehículos, incluso aeronaves, para evitar la posibilidad de que ocurra interferencia inaceptable a la señal ILS durante las operaciones ILS. Se protege el área sensible para evitar la interferencia proveniente de grandes objetos en movimiento fuera del área crítica pero que normalmente estén dentro de los límites del aeródromo.

A continuación, se contemplan algunas restricciones otorgadas por la FAA (2014), en el Order 6750.16E “SITING CRITERIA FOR INSTRUMENT LANDING SYSTEMS”.

Aunque es deseable restringir completamente las áreas críticas de todo tráfico de superficie, esto generalmente no es factible ya que el acceso hacia y desde la pista, áreas terminales, rampa, y áreas de hangares puede necesitar movimiento de tráfico a través de estas regiones. Por lo tanto, las restricciones deben ser lo suficientemente permisivas, como se indica en los apartados siguientes, para permitir este flujo de tráfico en condiciones controladas.

(1) Tráfico de superficie. Salvo lo dispuesto a continuación, y en la última edición de la Orden 7110.65, Control de Tráfico Aéreo, todo el tráfico de superficie debe permanecer alejado de las áreas críticas del localizador y de la pendiente de planeo siempre que el equipo esté en

funcionamiento. El estacionamiento de vehículos o aeronaves desatendidos dentro de esta área está prohibido en todo momento, excepto para los vehículos de los técnicos de mantenimiento, que pueden estacionarse adyacentes al refugio del equipo.

(2) Usuarios no aeronáuticos. Cuando usuarios ajenos a la aviación pasen por el área crítica y se prevea una degradación inaceptable de por el movimiento del tráfico a lo largo de estas rutas (por ejemplo, en carreteras, autopistas, vías de ferrocarril, etc.), deberán tomarse medidas eficaces para superar la condición. Dichas medidas pueden incluir la modelización matemática y/o la inspección en vuelo (para determinar la magnitud de la degradación), el control del tráfico a lo largo de la ruta o la elevación/reubicación del conjunto de antenas.

(3) Vehículos de mantenimiento. Los vehículos de mantenimiento podrán atravesar la zona crítica por las carreteras de acceso a cuando se desplacen hacia y desde el refugio de equipos, siempre que no se detengan y que la ruta no pase por las inmediaciones de la antena.

El área crítica necesaria para las antenas del localizador se representa en la *Ilustración 2-11*, donde se puede evidenciar que mientras más alta sea la categoría del ILS, la dimensión del área crítica es más grande.

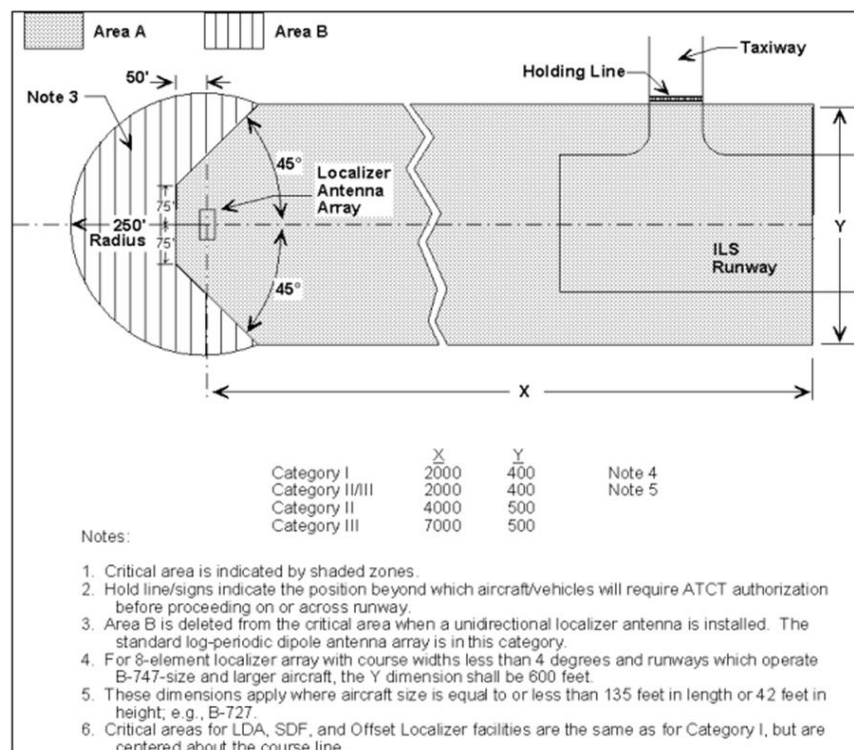


Figure 1-2. Category I, II, & III Localizer Critical Area

Ilustración 2-11: Dimensiones del área crítica del Localizador según la categoría del ILS.

Fuente: SITING CRITERIA FOR INSTRUMENT LANDING SYSTEMS, FAA (2014).

El área crítica, para las pendientes de planeo, se identifica en la *Ilustración 2-12*, se visualiza como el pentágono pintado. Donde aumenta el área con relación a la magnitud de la aeronave y en algunos casos según la categoría del ILS.

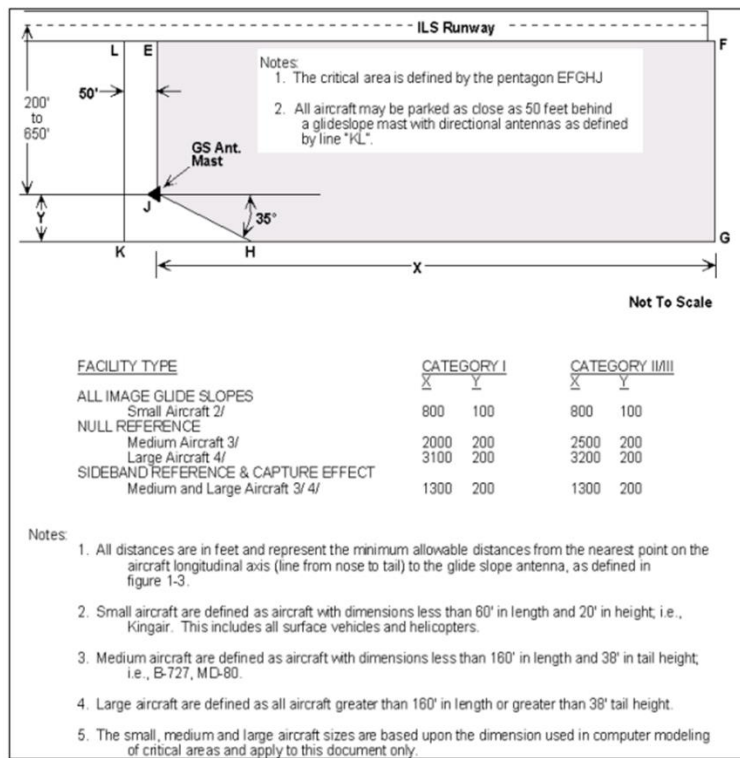


Figure 1-3. Image Glide Slope Critical Area

Ilustración 2-12: Dimensiones del área crítica de la senda de planeo según la categoría ILS y el tamaño de la aeronave.

Fuente: SITING CRITERIA FOR INSTRUMENT LANDING SYSTEMS, FAA (2014).

2.2.2 Concepto GBAS

Es un sistema de GPS diferencial que utiliza múltiples estaciones (3 o más) dentro de un área local de aproximadamente 23 millas náuticas (NM). El cual se divide en tres subsistemas;

satelital, terrestre y aeronave, los cuales se ven representados en la *Ilustración 2-13*. Según la *Guía para la implementación de sistemas de aumentación basados en tierra de la OACI*. La estación terrestre del GBAS está compuesta por receptores de referencia con antenas instaladas en ubicaciones donde se ha realizado un levantamiento topográfico preciso. La información generada por cada receptor se envía a un procesador que calcula las correcciones para cada satélite de navegación visible. La difusión de esta información es recibida por las aeronaves dentro del alcance de la cobertura VHF, que también captan señales de los satélites de navegación. Luego, utilizan las correcciones diferenciales de la información recibida directamente de los satélites para calcular una posición precisa. Esta posición precisa, junto con los datos de los puntos de la trayectoria, se utilizan para proporcionar señales de desviación a los sistemas adecuados en la aeronave, que apoyan las operaciones de aproximación de precisión. Las indicaciones de aproximación del GBAS que recibe el piloto son similares a las señales de rumbo y trayectoria de planeo del ILS.

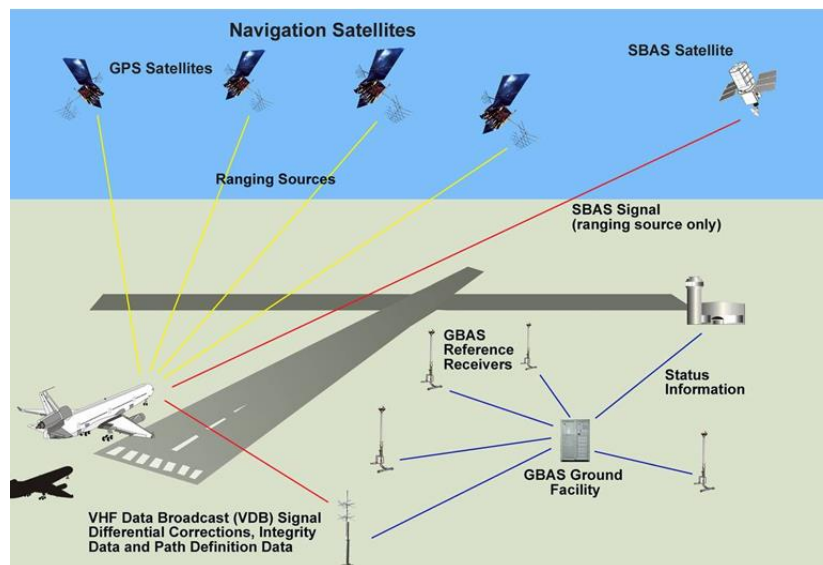


Ilustración 2-13: Representación subsistemas de una instalación GBAS.

Fuente: OACI, 2013.

2.2.3 Concepto SBAS.

Siguiendo la misma línea del GBAS, se encuentra otro sistema de aumentación de precisión para apoyar a las aproximaciones, similar en características, el cual es el Sistema de Aumento por Satélite (SBAS), el que consiste en “un aumento de área amplia o regional mediante el uso de satélites geoestacionarios (GEO) que transmiten la información de aumento. Un SBAS aumenta la(s) constelación(es) GNSS primaria(s) al proporcionar información de alcance, integridad y corrección GEO.” (ICAO, 2021).

Con relación a la infraestructura necesaria, se requiere de una constelación GNSS, satélites geoestacionarios, estaciones de referencia, instalaciones de procesamiento y estaciones transmisoras. Se representa gráficamente en la *Ilustración 2-14*.

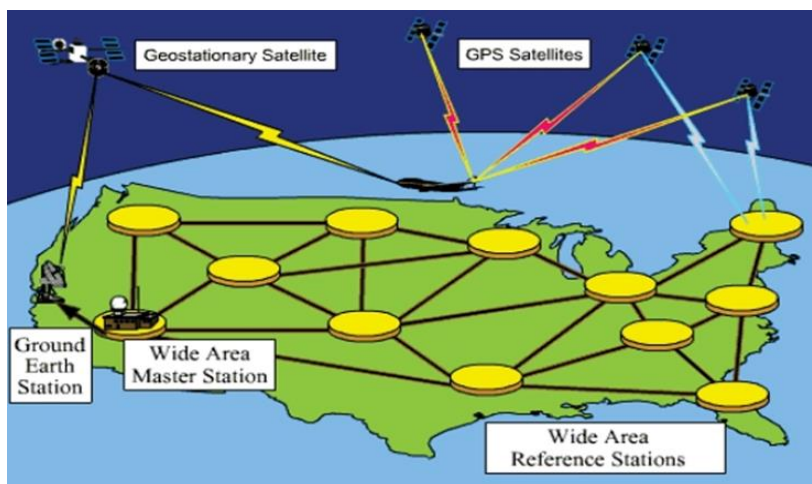


Ilustración 2-14: Infraestructura necesaria para un sistema SBAS.

Fuente: The Instrumented Landing System (ILS), Airbus, 2023.

Por otro lado, su funcionamiento se basa en lo siguiente:

- Recopilación de Datos GNSS: Las estaciones de referencia capturan información GNSS y la transmiten a la estación específica SBAS.

- Generación de Mensajes SBAS: La estación maestra SBAS crea mensajes de usuario SBAS cada segundo. Estos mensajes contienen correcciones para eliminar errores en la señal GNSS.
- Transmisión de Mensajes: Los mensajes se envían desde la estación maestra SBAS a las estaciones de enlace ascendente, que los transmiten a las cargas útiles de navegación en satélites geoestacionarios.
- Procesamiento por Receptores GNSS/SBAS: Los receptores GNSS/SBAS utilizan estos mensajes para mejorar la estimación de posición, logrando una precisión de unos pocos metros.

Además, el SBAS sigue estándares estrictos de integridad y seguridad, notificando rápidamente a los usuarios sobre información peligrosamente engañosa. Según *ICAO*, sus principales beneficios son que este sistema es capaz de proporcionar aproximación de precisión en todos los aeropuertos que estén **dentro de la cobertura en todo un continente**, lo cual lo posicionaría rentable. Además, permite aproximación curva para acortar la aproximación o las zonas sensibles de ruido.

Existen diversos tipos de SBAS, así como el *Wide Area Augmentation Service (WAAS)* de Estados Unidos, *European Geostationary Navigation Overlay Service (EGNOS)* de Europa o *Korea Augmentation Satellite System (KAAS)* en Corea. Para Latinoamérica aún no se ha concretado ningún sistema ya que no se ha evidenciado interés en la región y por complicaciones con la ionosfera en latitudes bajas. Sin embargo, según *Thales Alenia Space*, empresa relacionada con la tecnología aeroespacial y la cual desarrolla estos sistemas, han desarrollado un nuevo algoritmo para corregir los problemas con la ionosfera, el cual fue probado en Brasil entre 2023 y 2024, logrando precisiones favorables.

“La mayoría de las regiones del mundo han optado por desplegar el SBAS debido a los beneficios demostrados en materia de seguridad y economía. Se ha convertido en una

norma. CAR-SAM es una de las últimas regiones del mundo que no está equipada.” (Thales Alenia Space, 2023).

2.2.4 Infraestructura y componentes.

Estos sistemas de precisión de ayuda a los aterrizajes cuentan con diversa infraestructura para poder cumplir con sus funcionamientos, se requieren componentes tanto satelitales como en tierra. A continuación, se detalla la infraestructura necesaria para GBAS y SBAS.

Ground-Based Augmentation System:

Los componentes de GBAS se pueden visualizar en la *Ilustración 2-15*, donde para un mejor entendimiento se encuentran marcados con un número y se describen a continuación:

- **Subsistema satélite:**

Está compuesto por la Constelación de satélites GNSS (1). Según el Anexo 10, son dos las constelaciones satelitales que han incorporado las Normas y Métodos Recomendados (SARP): El GPS de Estados Unidos, y el GLONASS de la Federación Rusa.

- **Subsistema terrestre:**

Está compuesto por la estación terrestre y las antenas asociadas.

RRA (Reference Receiver Antenna) (2): Es una de las componentes críticas del sistema de aumento basado en tierra. Su función principal es recibir las señales de los satélites GPS para que el sistema GBAS pueda procesarlas y generar las correcciones diferenciales necesarias para mejorar la precisión de las posiciones GPS utilizadas por las aeronaves. Se necesitan 4 RRA, situadas no muy distantes unas de otras y normalmente dentro del recinto aeroportuario para facilitar la configuración.

VDB (VHF Data Broadcast) (3): Su función principal es transmitir las correcciones diferenciales calculadas por la estación de referencia a las aeronaves. Estas correcciones mejoran la precisión, integridad y disponibilidad de las señales GPS utilizadas por las aeronaves para la navegación y los aterrizajes de precisión. La antena emite en la banda VHF de manera omnidireccional, cubriendo un radio nominal de entre 20 y 30 millas náuticas (NM).

Estación de referencia terrestre (GBAS Ground Facility) (4): Esta estación se encuentra cerca del aeropuerto y recopila datos GNSS de satélites. Utiliza estos datos para calcular correcciones diferenciales y mensajes de integridad. La estación también transmite estos datos a las aeronaves mediante una radiodifusión de datos VHF.

Shelter (Refugio) (5): El shelter es una estructura física que alberga los componentes electrónicos críticos del GBAS. Dentro de él, se encuentran computadoras, antenas y otros equipos necesarios para el funcionamiento del sistema. El shelter protege estos componentes de las condiciones climáticas y otras interferencias.

- **Subsistema aeronave:**

Compuesto por el receptor a bordo de la aeronave (6). La aviónica del GBAS emplea solo aquellos satélites GPS para los cuales recibe correcciones válidas desde tierra. Si la instalación terrestre del GBAS identifica un posible problema con un satélite GPS o no puede monitorear un satélite GPS, cesa la transmisión de correcciones para ese satélite en particular. De este modo, la aviónica del GBAS deja de utilizar el satélite afectado.

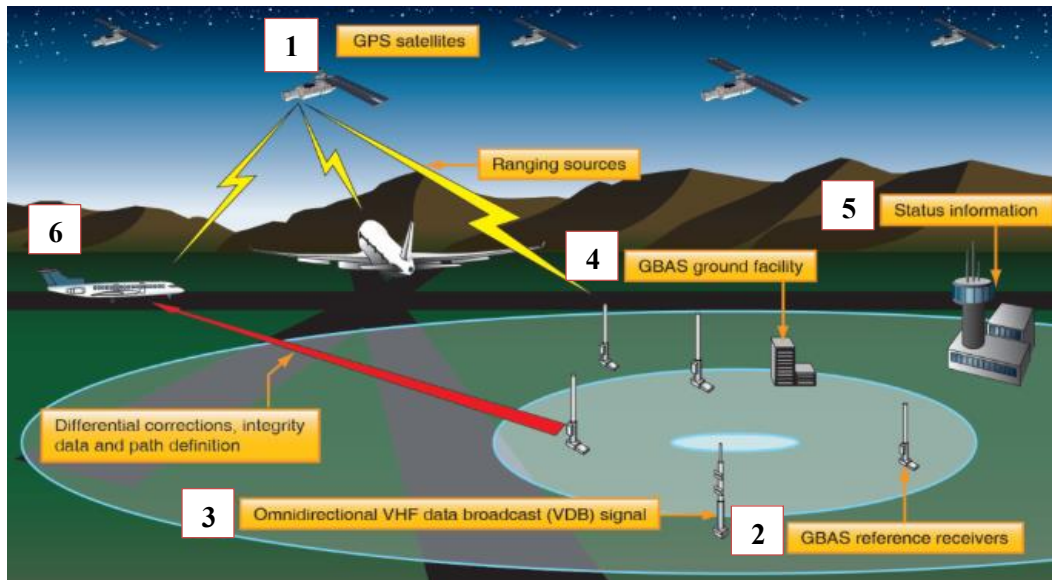


Ilustración 2-15: Sistemas y componentes de GBAS.

Fuente: (Macías, s.f.).

“La instalación de un subsistema de tierra GBAS implica consideraciones especiales en cuanto a la selección de posibles emplazamientos para las antenas del receptor, de referencia y de la(s) antena(s) VDB. Al planificar el emplazamiento de las antenas, deben satisfacerse los requisitos de limitación de obstáculos del Anexo 14. Debe llegarse a un compromiso con respecto a la altura conveniente de la antena, basándose en los análisis, para asegurar que se satisfacen, dentro del volumen de cobertura, los requisitos de intensidad de la señal. Debe también prestarse atención al efecto de las características del terreno y de los edificios en el entorno de multitrayectos”. (OACI, 2013).

Satellite Based Augmentation System:

El SBAS igualmente que el GBAS, está compuesto por un subsistema de satélites y un subsistema en tierra, los cuales están distribuidos por toda la región.

Estaciones de referencia (RIMS): Reciben las señales de los satélites GNSS. Se necesitan varias RIMS en distintas partes del territorio y con una ubicación precisa que pueda captar cualquier error de los satélites. Para EGNOS se utilizan 38 estaciones de referencia. Posteriormente, mandan la señal GNSS a un CPF.

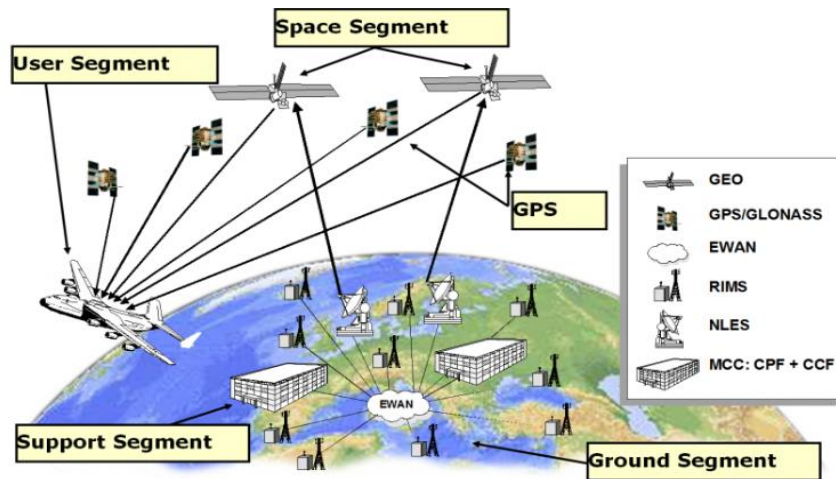
Estación máster (MCC): La estación máster está compuesta por centros de procesamiento (CPF) e instalaciones de control central (CCF). Se corrigen los mensajes y se envían desde la estación maestra SBAS a estaciones de enlace ascendente (NLES) para su transmisión a cargas útiles de navegación en satélites de comunicaciones geostacionarios (GEO).

- **Centro de procesamiento (CPF):** Se recolecta la información de la señal GNSS, se computa y se elaboran mensajes que se transmiten a la estación maestra SBAS. Estos mensajes contienen información que permite a los receptores GNSS/SBAS eliminar errores en la señal GNSS, permitiendo un aumento significativo de la precisión e integridad de la localización.
- **Instalación de control central (CCF):** Se encargan de supervisar y controlar todo el sistema SBAS. Monitorea la misión y los satélites, predice el rendimiento del servicio, archiva los datos generados y proporciona interfaz con PACF y el control de tráfico aéreo. Funcionan las 24 horas del día y se prevé tener 4 CCF. Uno activo, dos como respaldo en caliente y uno de respaldo en frío.

Estación de enlace ascendente (NLES): Las estaciones NLES se encargan de recibir los mensajes generados por los distintos CPF de SBAS para enviarlos al transponder (satélites geostacionarios), creando así una señal similar a la del GPS. Estas estaciones pueden elegir automáticamente el CPF más adecuado entre cuatro opciones. Para cada uno de los tres satélites SBAS, hay dos estaciones NLES asignadas (una principal y otra de respaldo), sumando un total de seis estaciones operativas.

Satélites geostacionarios (GEO): Reciben la señal y envían la información a las aeronaves. El receptor GNSS/SBAS de las aeronaves procesan este mensaje SBAS como estimación de la posición de la aeronave.

Para un mejor entendimiento de la infraestructura necesaria para un sistema SBAS, se visualizan todos los componentes en la siguiente *Ilustración 2-16*.



Fuente: (Navipedia, s.f.)

Para el caso de los sistemas SBAS que ya existen en otros continentes como Europa (EGNOS), Norteamérica (WAAS) y Corea (KAAS), se muestra a continuación la cantidad de infraestructura que utiliza para la implementación de SBAS. Donde todos estos componentes fueron esparcidos por cada región de manera estratégica para el óptimo funcionamiento del sistema. Estos componentes se evidencian en la *Tabla 2-2*.

Tabla 2-2: Cantidad de componentes SBAS para EGNOS, WAAS y KAAS.

Infraestructura	Sistemas SBAS		
	EGNOS	WAAS	KAAS
RIMS	40	38	7
MCC	4	3	2
NLES	6	6	3
GEO	3	3	2

Fuente: Soley, Regional workshop on SBAS for Latin America stakeholders, 2025.

2.2.5 Limitaciones

La principal dificultad, según la *OACI*, que presentan ambos sistemas de aumento de la señal GNSS para la aproximación es la **interferencia producida por la ionósfera**, este fenómeno afecta las señales difundidas por el GNSS, como "retardo de grupo" o "centelleo ionosférico".

Como explicó Autran (conferencia, 2025) durante el Regional Workshop on SBAS for Latin America Stakeholders, debido al alto nivel de ionización presente en la ionosfera, la refracción de las ondas de radio provoca retrasos no despreciables en las mediciones GNSS. El centelleo es la consecuencia de irregularidades de pequeña escala en la ionosfera que dispersan las ondas de radio y generan fluctuaciones rápidas (centelleo) en la amplitud y la fase de las señales de radio. Los retrasos de la ionosfera no corregidos adecuadamente pueden degradar la precisión del posicionamiento GNSS en varias decenas de metros, especialmente en dirección vertical.

Los errores en las mediciones de pseudodistancia debido al retardo de grupo suelen ser del orden de unas pocas décimas de metro, pero en casos raros pueden superar los 100 metros. La ionosfera perjudica a latitudes bajas como por ejemplo Brasil. En latitudes medias hay mínimos retardos de grupo. Sin embargo, los distintos sistemas GNSS utilizan diferentes enfoques para la corrección de los retardos.

Con relación a Chile, se puede evidenciar en la *Ilustración 2-17*, que éste se encuentra en la zona de latitudes medias, por ende, se encontraría en una zona de mediano riesgo por los efectos de la ionosfera.

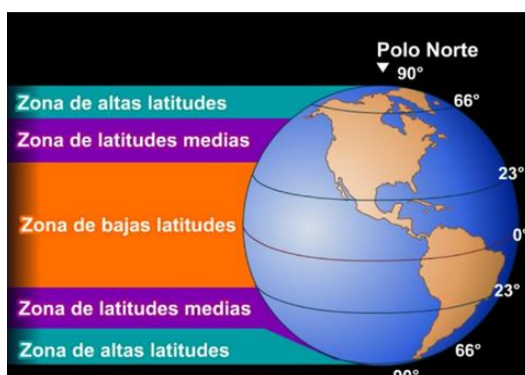


Ilustración 2-17: Zonas según su latitud.

Fuente: Google.

“Es importante observar que estas operaciones GBAS fueron realizadas mayormente en Estados ubicados en latitudes medias y que la operación del GBAS en bajas latitudes sigue siendo un gran desafío debido al efecto de la ionósfera. Brasil ha liderado un análisis de seguridad del GBAS en bajas latitudes, y se reconoció que las lecciones aprendidas serían de gran ayuda para los Estados interesados en instalar el GBAS y que enfrentan los mismos retos en sus proyectos de desarrollo y evaluación del GBAS...También se observó que se estaba desarrollando varias mejoras técnicas prometedoras, tales como el GBAS de multi-constelación y doble frecuencia...” (Resultados del seminario/taller de infraestructura de navegación de soporte a la PBN, OACI, 2016).

Para el caso de SBAS, según (Thales Alenia Space, 2023), “La tecnología SBAS europea es la única que ya está lista, aplicable en la región CAR-SAM porque es la única capaz de soportar las fuertes condiciones de la ionosfera (como se ha demostrado en África), estando lista y siendo ya compatible con los receptores desplegados en los aviones. La tecnología desarrollada por Thales Alenia Space se basa en un amplio uso de Galileo para modelar y corregir los efectos de la ionosfera.”

En el “Regional LATAM SBAS Virtual Workshop”, según lo expuesto por (Autran, 2024), el cual es parte de *Thales Alenia Space*, señaló que los nuevos algoritmos de Thales permiten alcanzar una disponibilidad de LPV del 100% en condiciones de ionosfera tranquila y más del 95% en condiciones de ionosfera activa y severa en la región de América Latina (mientras que la integridad de las correcciones siempre se logra sin degradación). Por lo tanto, de la misma manera que las conclusiones en África central, que permitieron decidir que el proyecto ANGA SBAS comenzará la fase de desarrollo, la solución SBAS de *Thales Alenia Space* **se considera totalmente adaptada a la región de América del Sur.**

“Ya no hay problema técnico para desarrollar un SBAS en LATAM. SBAS se está convirtiendo en la referencia mundial para la seguridad aérea; la tecnología está ahí”. Autran (conferencia, 2025)

Para concluir, tanto el GBAS como el SBAS ofrecen soluciones avanzadas para mejorar la precisión y seguridad de las operaciones aeronáuticas, cada uno con características y beneficios particulares.

El GBAS se destaca por su alta precisión local, soporte para múltiples pistas, capacidad para aproximaciones en curva y guiado en aproximaciones frustradas, lo que lo convierte en una opción ideal para aeropuertos con alta densidad de tráfico y restricciones operativas. Su instalación local elimina interferencias en tierra y permite un uso más eficiente del espacio aeroportuario.

Por su parte, el SBAS, al operar a través de satélites geoestacionarios, proporciona cobertura a gran escala (continental), permitiendo una navegación precisa incluso en zonas remotas o en aeropuertos que no disponen de infraestructura terrestre compleja. Su integración con GNSS mejora la continuidad y exactitud de las señales, habilitando procedimientos similares a los del ILS CAT I. Además, su uso trasciende la aviación, beneficiando a otros sectores como la agricultura, el transporte marítimo y los drones.

En relación con la limitación de la ionosfera, se obtiene que solamente SBAS se encuentra en condiciones aptas para considerarse como propuesta de implementación en Chile y Latinoamérica al tener corregido los errores de la ionosfera por *Thales Alenia Space*. Con GBAS aún no existen documentos que respalden alguna mejora o corrección a los errores ocasionados por la ionosfera, lo cual sería una real limitante para su implementación ya que habría riesgos de errores.

2.3 Propuesta metodológica

Para llevar a cabo la metodología de este trabajo en base a los antecedentes recopilados, se realiza el siguiente mapa conceptual para clarificar los pasos a realizar en esta investigación sobre el análisis de beneficios de un sistema de aumentación de precisión para la aproximación por satélites para los aeropuertos de Chile.

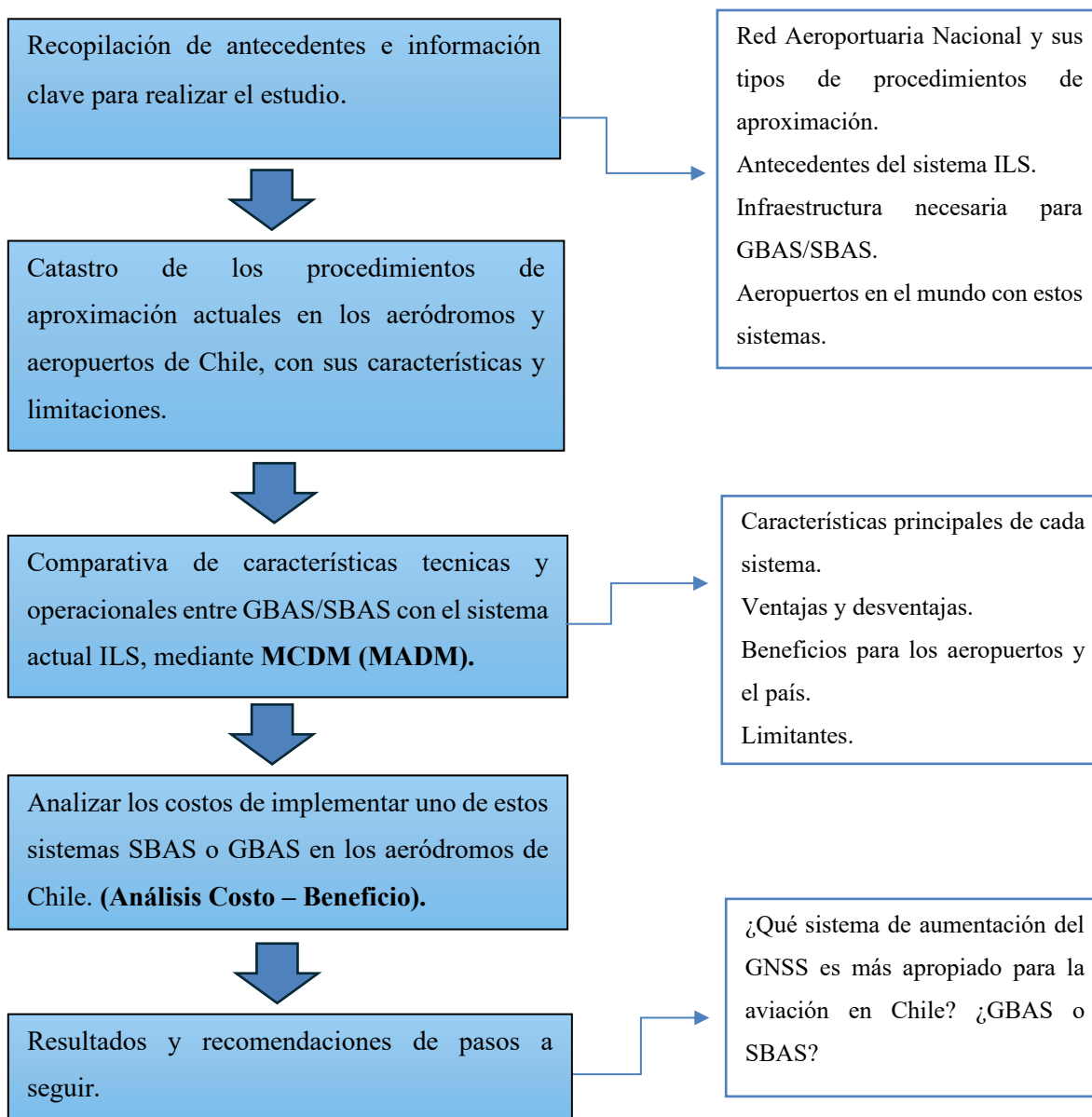


Ilustración 2-18: Esquema de la propuesta metodológica para analizar la prefactibilidad de implantación de un sistema de aumentación GNSS en los aeródromos de Chile.

Fuente: Elaboración propia.

Capítulo 3.

Desarrollo

3 Desarrollo.

Se utilizará el marco teórico de referencia para realizar un análisis de qué sistema de precisión es el más acorde y beneficioso según sus características para los aeropuertos/aeródromos de Chile, basándose primeramente en un análisis al actual sistema o procedimiento utilizado para la aproximación en la Red Aeroportuaria Nacional, posteriormente comparando características operativas y técnicas del SBAS y GBAS con el sistema ILS, además de un análisis de costos y beneficios otorgados por cada sistema para Chile. Finalmente, se entrega una propuesta de qué sistema de aumentación de precisión es más acorde para el país según toda la información recopilada.

3.1 Catastro de procedimientos de aproximación por instrumentos en la Red Aeroportuaria Nacional.

Con el fin de evaluar las condiciones operacionales actuales de los recintos aéreos del país y su nivel de preparación para soportar aproximaciones seguras y eficientes, se llevó a cabo un catastro detallado del sistema de ayudas a la aproximación en la Red Aeroportuaria Nacional.

Esta red está conformada por tres categorías principales, las cuales se detallaron en el apartado 2.1.1. La Red primaria, compuesta por 17 recintos aeroportuarios de mayor tráfico y relevancia estratégica; la Red secundaria, que incluye 10 aeródromos con funciones complementarias; y la Red de pequeños aeródromos, conformada por 283 instalaciones que atienden operaciones locales, de conectividad y emergencia.

Para esta evaluación, se recopiló información específica sobre el equipamiento presente en pista, con especial énfasis en la presencia del sistema de aterrizaje instrumental ILS (Instrument Landing System), el tipo de procedimientos de aproximación utilizados (ya sean convencionales o basados en navegación por satélite), y la disponibilidad de luminarias terrestres que apoyan las maniobras de aproximación y aterrizaje en condiciones de baja visibilidad (luces PAPI). Este levantamiento de datos constituye una base fundamental para analizar el estado actual de la infraestructura de navegación aérea del país y determinar las

brechas existentes en relación con las tecnologías modernas de aproximación, tales como GBAS y SBAS, además de evidenciar la cantidad de aeródromos que se verían beneficiados con la incorporación de alguno de esos sistemas.

		Ciudad	Nombre	ILS	Tipo de aproximación	LUCES	
						APCH	PAPI
Red primaria	Aeropuertos	Arica	Chacalluta	NO	RNP (LNAV only)	SI	SI
		Iquique	Diego de Aracena	I	ILS	SI	SI
		Antofagasta	Andrés Sabella	NO	RNP AR	NO	SI
		Isla de Pascua	Mataverí	I	ILS	SI	SI
		Santiago	Arturo Merino Benítez	IIIB	ILS	SI	SI 3°
		Puerto Montt	El Tepual	I	ILS	SI	SI 3°
		Punta Arenas	Pte. Carlos Ibañez del Campo	I	ILS	SI	SI 3°
	Aeródromos	Calama	El Loa	NO	RNP AR	SI	SI
		Caldera	Desierto de Atacama	I	ILS	SI	SI
		La Serena	La Florida	NO	RNP AR	SI	SI
		Concepción	Carriel Sur	IIIB	ILS	SI	SI 3°
		Freire	La Araucanía	IIIB	ILS	SI	SI 3°
		Valdivia	Pichoy	I	ILS	SI	SI 3°
		Balmaceda	Balmaceda	NO	RNP AR	NO	SI
Red secundaria	Aeródromos	Osorno	Cañal Bajo Carlos Hott Siebert	NO	RNP AR	SI	SI
		Castro	Mocopulli	I	ILS	SI	SI 3°
		Puerto Natales	Teniente Julio Gallardo	NO	RNP AR	NO	SI 3.2°
		El Salvador	Ricardo García Posada	NO	VFR	NO	SI
		Vallenar	Vallenar	NO	VFR	NO	NO
		Viña del mar	Viña del mar	I	ILS	SI	SI 3.2°
		Santiago	Eulogio Sánchez	NO	VFR	NO	SI
		Chillán	General Bernardo O'Higgins	NO	RNP (LNAV only)	SI	SI 3°
		Los Ángeles	María Dolores	NO	RNP (LNAV only)	NO	SI
		Pucón	Pucón	NO	VFR	NO	NO
Red pequeños aeródromos	Aeródromos (7 de 283)	Chaitén	Nuevo Chaitén	NO	VFR	NO	SI 3°
		Coyhaique	Teniente Vidal	NO	VFR	NO	NO
		Porvenir	Porvenir Capitán Fuentes Martínez	NO	VOR/DME	NO	SI
		Puerto Williams	Puerto Williams Guardiamarina Zañartu	NO	RNP (LNAV only)	NO	NO
		Antártica	Teniente Rodolfo Marsh	NO	RNP (LNAV only)	SI	SI 3°
		Ovalle	El Tuqui	NO	VFR	NO	NO
		Santo Domingo	Santo Domingo	I (Solo instrucción)	RNP (LNAV only)	NO	NO
Talca	Panguilemo	NO	VFR	NO	NO		
Victoria	Victoria	NO	VFR	NO	NO		
Villarica	Villarica	NO	VFR	NO	NO		
Juan Fernández	Robinson Crusoe	NO	VFR	SI	SI		
Colina	Peldehue	NO	VFR	NO	SI 3°		

Ilustración 3-1: Catastro de la implementación del sistema ILS y los procedimientos de aproximación utilizados por la Red Aeroportuaria Nacional.

Fuente: Elaboración propia, con datos obtenidos del IFIS.

En la *Ilustración 3-1*, se encuentra subrayado en color naranja los aeródromos/aeropuertos que no cuentan con un sistema de aproximación de precisión ILS, en color celeste los recintos aeroportuarios que cuenta con un sistema ILS Categoría I y en color verde los que tienen incorporado un sistema ILS Categoría IIIB.

Hay que considerar que, para la red de pequeños aeródromos, se exponen en la *Ilustración 3-1* solo los recintos que aparecen en los procedimientos del IFIS. Estos deben aterrizar bajo procedimiento VFR, a pesar de que tienen una carta de aproximación (IAC) con la utilización de RNP (LNAV only), sin embargo, estos aeródromos no están certificados para realizar ese tipo de aproximación (IFR).

En el caso de los aeródromos que no cuentan con un sistema ILS de ayuda a la aproximación, se evidencia que se pueden utilizar distintos tipos de procedimientos de aproximación de no precisión. Los cuales pueden ser los siguientes: RNP (AR con VNAV/LNAV o APCH (LNAV only)) o si no cuenta con ninguno de estos procedimientos, las aeronaves solo pueden aproximar de forma VFR. Todos estos procedimientos se encuentran descritos en el apartado 2.1.2.

En la *Tabla 3-1*, se visualiza un resumen de los tipos de aproximación utilizados en la Red Aeroportuaria Nacional.

Tabla 3-1: Cantidad de aeródromos/aeropuertos por cada procedimiento/sistema de aproximación utilizado en Chile.

Red aeroportuaria	Tipo de aproximación				
	ILS		RNP		VFR
	CAT I	CAT IIIB	AR	APCH (LNAV only)	
Primaria	7	3	6	1	0
Secundaria	1	0	0	4	7
Pequeños aeródromos	0	0	0	1	282
Totales	11		12		289

Fuente: Elaboración propia, datos obtenidos de (AIP – Chile, 2024).

Con relación a la *Tabla 3-1*, existen 11 aeródromos en Chile que cuentan con sistema ILS, y 3 aeródromos que cuentan con la categoría más alta (CAT IIIB). Hay 6 recintos aeroportuarios de la Red Primaria que utilizan aproximación satelital RNP AR. Existen otros seis aeródromos que cuentan con RNP (LNAV only), el cual es una aproximación de precisión solo con guía lateral que permite optimizar el espacio aéreo requerido. En el resto

de los aeródromos, es decir un total de 289, las aeronaves pueden realizar la aproximación solamente de manera visual (VFR).

3.1.1 Sistema actual de ayuda a la aproximación ILS.

El Instrument Landing System es el sistema de ayuda para la aproximación utilizada mayoritariamente en los aeropuertos del país. Se compone de distintas antenas localizadoras, ubicadas en los cabezales de pista. Este sistema provee información de guía vertical y horizontal para que las aeronaves realicen aterrizajes de precisión ante visibilidades mínimas según su categoría.

Con la información recabada de la DGAC, se puede evidenciar la cantidad de aeródromos y aeropuertos de la Red Primaria que tienen implementado un sistema ILS y con qué categoría cuentan en la actualidad (2025). Lo anteriormente mencionado se visualiza en la *Tabla 3-2*.

Tabla 3-2: Implementación del sistema ILS y su categoría en la Red Primaria Aeroportuaria.

	Ciudad	Nombre	Categoría ILS
Aeropuertos	Arica	Chacalluta	NO
	Iquique	Diego de Aracena	I
	Antofagasta	Andrés Sabella	NO
	Isla de Pascua	Mataverí	I
	Santiago	Arturo Merino Benítez	IIIB
	Puerto Montt	El Tepual	I
	Punta Arenas	Pte. Carlos Ibáñez del Campo	I
Aeródromos	Calama	El Loa	NO
	Caldera	Desierto de Atacama	I
	La Serena	La Florida	NO
	Talcahuano	Carriel Sur	IIIB
	Freire	La Araucanía	IIIB
	Valdivia	Pichoy	I
	Balmaceda	Balmaceda	NO
	Osorno	Cañal Bajo Carlos Hott Siebert	NO
	Castro	Mocopulli	I

Fuente: Elaboración propia, con datos obtenidos del IFIS.

Con relación a los 7 aeródromos de la Red Primaria que cuentan con la categoría ILS I, las aeronaves pueden aterrizar a una visibilidad no inferior a 800 metros y con una decisión de altura mínima de 200 ft. En cambio, para los 3 aeródromos con categoría IIIB, las aeronaves pueden aproximar a la pista si cuentan con una visibilidad no inferior a 50 metros.

Los aeropuertos que no cuentan con un sistema ILS se han visto afectados en variadas oportunidades, conllevando atrasos en sus vuelos o cancelaciones por las condiciones climáticas, como se pudo evidenciar en las noticias descritas anteriormente sobre el aeródromo de la Florida y en el caso del Tepual, que tuvo una falla en la senda de planeo de su ILS.

Condiciones y restricciones del ILS en Chile.

El Instrument Landing System depende de sus antenas en el cabezal de pista y de un área crítica del ILS, lo cual lo hace más riesgoso ya que al tener su infraestructura en tierra es propenso a fallas por condiciones climáticas adversas, como consecuencia de su ubicación que lo hace vulnerable a ser afectado accidentalmente por factores externos como camiones trabajando cercanos a la pista o vientos fuertes que puedan afectar a la infraestructura.

Por lo anterior, en caso de fallas o incluso para incorporar este sistema, necesita cerrar temporalmente la pista para poder revisarlo y/o realizar la implantación del ILS, lo que genera cancelaciones y/o atrasos por parte de las aerolíneas hacia el pasajero, dificultando la operación del aeródromo en el caso se cuente con solo una pista, como lo es en casi todos los aeródromos y aeropuertos del país, menos en AMB.

Como se explicó en el apartado 2.1.3, este sistema necesita contar con áreas protegidas para que no se presenten interferencias las antenas del localizador o la senda de planeo, como las recién mencionadas, ya que esta infraestructura es emplazada en tierra.

Se expone como ejemplo el Ap. Arturo Merino Benítez de Santiago, el cual cuenta con un ILS CAT IIIB, donde se puede evidenciar las magnitudes de estas áreas en la siguiente

Ilustración 3-2, la cual muestra el área crítica y sensible de la pista 17L. Se puede visualizar que el área sensible alcanza más allá de la carretera que pasa por fuera del aeropuerto, por lo que cualquier edificación en ese territorio estará sujeta a una evaluación previa por la posible interferencia que pueda tener con el sistema ILS.



Ilustración 3-2: Representación de las áreas protegidas del Localizador y Senda de Planeo de la pista 17L.

Fuente: Departamento de Logística, DGAC, 2024.



Ilustración 3-3: Fotografía de un área crítica del Ap. Arturo Merino Benítez.

Fuente: Elaboración propia.

En la *Ilustración 3-3*, se visualiza la prohibición de entrada de un área crítica del ILS, donde se evidencia también la antena DME y senda de planeo y una caseta donde se encuentran los sistemas del ILS.

Con relación a los costos por utilización de ILS en el aeródromo, las aerolíneas pagan como concepto de tasa aeronáutica a la DGAC. Si la aerolínea o FBO cuenta con un Convenio de Pago, la DGAC le cobra de manera mensual por sus aterrizajes utilizando este sistema, en caso contrario, al no contar con este convenio, se debe pagar por cada vuelo realizado las respectivas tasas aeronáuticas, donde se encuentra la utilización del ILS. Este pago se efectúa a la caja comercial de la DGAC.

Ilustración 3-4: Tarifario segundo trimestre 2025: Tasas de servicios ILS.

Peso máximo de despegue de la aeronave	Valor (\$)
Hasta 10 toneladas	38.043
Sobre 10 toneladas y hasta 60 toneladas	73.507
Sobre 60 toneladas	102.972

Fuente: DGAC.

Como se observa en la *Ilustración 3-4*, la DGAC cobra según el Peso Máximo de Despegue (PMD) y en pesos chilenos. Cabe recalcar que este valor es el mismo tanto para el ILS CAT I como para el CAT IIIB.

Otro dato para destacar es que hay aeródromos que a pesar de tener instalado un sistema ILS, los operadores no lo ocupan en todos sus aterrizajes. Como ejemplo, el aeródromo Desierto de Atacama, el cual tiene instalado su sistema ILS en la pista 17, pero como en aquel aeródromo se da el fenómeno de vientos cruzados, ocurre que las aerolíneas siempre que puedan aterrizar en la pista 35 les piden autorización a los controladores locales y así se ahorran el cobro por utilización de este sistema.

En la *Ilustración 3-5* se evidencia el total de aterrizajes en el mes de abril 2025 de los aeródromos que tienen instalado un sistema ILS y la cantidad de arribos que ocuparon el sistema ILS. Mayoritariamente los que no ocupan este sistema, solo utilizan la radio ayuda. Además, se exceptúa el Ap. Arturo Merino Benítez ya que, por su condición del viento, mayoritariamente aterriza en la pista 17R o 17L, y estas dos cuentan con sistema ILS instalado.

Aterrizajes de vuelos nacionales del 01 al 30 de abril 2025							
Aerolínea / Aeródromo	Latam Airlines	Sky Airlines	Jetsmart Airlines	Otros operadores	Total aterrizajes	Total aterrizajes con ILS	Porcentaje de utilización
Ap. Diego Aracena	203	89	78	35	405	1	0%
Ap. Mataverí	39	-	-	2	41	0	0%
Ap. El Tepual	298	256	42	68	664	385	58%
Ap. Carlos Ibáñez del Campo	126	38	4	132	300	157	52%
Ad. Desierto de Atacama	120	44	-	2	166	40	24%
Ad. Carriel sur	353	73	146	138	710	204	29%
Ad. La Araucanía	150	30	23	10	213	101	47%
Ad. Pichoy	32	19	-	2	53	23	43%
Ad. Mocopulli	31	17	-	7	55	28	51%
Ad. Viña del mar	-	-	-	21	21	0	0%
Totales					2.628	939	36%

Ilustración 3-5: Total de aterrizajes nacionales en abril del 2025 en los aeródromos/aeropuertos que cuentan con ILS, exceptuando Ap. AMB.

Fuente: Elaboración propia, con datos obtenidos del Anexo 21 de cada aeródromo de abril 2025, obtenido del Sistema de Administración de Clientes de la DGAC.

Se puede destacar de la *Ilustración 3-5* que, en el mes mencionado, solo hay tres aeródromos que ocupan en más de 50% de sus arribos el sistema ILS, siendo El Tepual, Carlos Ibáñez del Campo y Mocopulli, lo cual tiene concordancia, ya que estos aeródromos están localizados al sur del país por ende la visibilidad es más baja que en otros sectores. Hay aeropuertos como Diego Aracena y Mataverí, que en aquel mes tuvieron un 0% de utilización.

A nivel general, hay un promedio de utilización del 36% del sistema ILS, lo cual es un porcentaje bajo, menos de la mitad de los arribos nacionales de abril. Esto ocurre principalmente porque como se mencionó anteriormente, hay pilotos que deciden por su cuenta o por la aerolínea realizar aterrizajes en el cabezal de pista que no cuenta con un sistema ILS, utilizando procedimientos RNP AR autorizados para aterrizar, sin embargo, no tan precisos como uno con ILS. Lo cual con SBAS o GBAS no ocurriría ya que estos sistemas ofrecen esta tecnología para ambos cabezales de pista, dentro de un radio de 23 [nm] (GBAS) o para la región completa de Latinoamérica y Caribe (SBAS), por lo que los pilotos siempre realizarán aterrizajes mediante este procedimiento.

3.1.2 Sistema de navegación BARO/VNAV

Esta forma de navegación se encuentra dentro de los procedimientos APV, es decir “Procedimiento de aproximación con guía vertical”. Donde APV- BARO/VNAV significa “Navegación vertical barométrica”, por lo cual el altímetro de presión transmite la altitud a la aeronave y envía la información al sistema a bordo.

Los mínimos operacionales de este procedimiento son “LNAV/VNAV”. En donde, el guiado lateral (LNAV) es informado por los satélites GNSS, **denominado RNP APCH**. El guiado vertical (VNAV) es entregado por el altímetro barométrico.

A pesar de que este procedimiento mejora la seguridad de los procedimientos de no precisión, entregando un descenso guiado y estabilizado. Tiene un riesgo con relación a la altitud barométrica informada.

La OACI publicó su Boletín 2023_00, sobre los riesgos relacionados a los errores del altímetro en aproximaciones APV BARO/VNAV y de no precisión, resaltando que producto de incidentes recientes han puesto de relieve que un ajuste erróneo del altímetro puede tener graves consecuencias para la seguridad del vuelo durante las operaciones de aproximación final.

“Los altímetros de presión de aeronaves se calibran de acuerdo con la Atmósfera Estándar Internacional, para indicar la elevación de la aeronave por encima de un punto de referencia seleccionado. El punto de referencia seleccionado depende de la presión barométrica de referencia establecida en la subescala del altímetro, que puede ser:

- QNH o presión local en un lugar de referencia, convertida a nivel medio del mar: en este caso el altímetro indicará la altitud de la aeronave.
- 1013,2 [hPa]: en este caso el altímetro indicará el Nivel de Vuelo de la aeronave.
- QFE o presión local en un lugar de referencia: en este caso el altímetro indicará la altura de la aeronave por encima de esa ubicación de referencia.”

(OACI, 2023)

Por lo cual existe el riesgo latente de que un error en el ajuste del altímetro barométrico, provoque desviaciones significativas en el altímetro, donde un error en un 1 [hPa] implicaría aproximadamente 30 [ft] de diferencia de altitud. Aumentando el riesgo de un vuelo controlado contra el terreno (CFIT), lo cual se refiere a una colisión o casi colisión contra un obstáculo sobresaliente del terreno de una aeronave en vuelo. Esto se puede visualizar en la *Ilustración 3-6*.

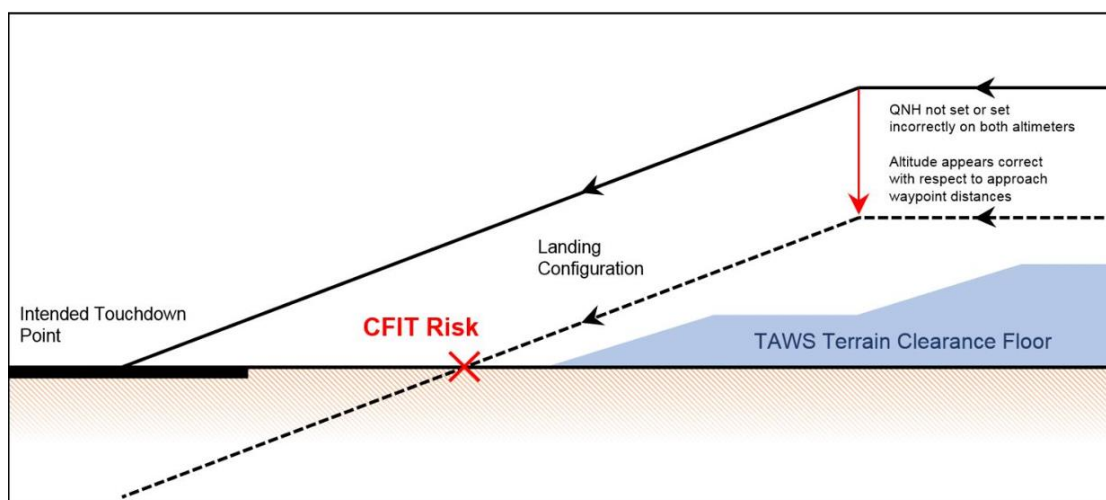


Ilustración 3-6: Diagrama sobre el riesgo de CFIT.

Fuente: (Civil Aviation Authority, 2023).

El 23 de mayo de 2022 fue reportado un incidente con un Airbus A320 operado por AirHub, el cual realizaba el trayecto entre el aeropuerto de Estocolmo-Arlanda (Suecia) y hacia el aeropuerto de París-Charles de Gaulle (Francia). Donde, en el aeropuerto de destino se estaban realizando trabajos al sistema ILS, por lo cual la tripulación realizó una aproximación RNP APCH (APV BARO/VNAV).

Durante la aproximación al aeropuerto París-Charles de Gaulle bajo fuertes precipitaciones y baja visibilidad, la tripulación recibió un QNH incorrecto (1011 [hPa] en vez de 1001 [hPa]), por parte del control de tránsito aéreo. Esto causó que el avión volara aproximadamente 85 [m] (280 [ft]) por debajo del perfil vertical publicado, aunque mantenía un perfil paralelo.

Este error no fue detectado ni por los instrumentos de a bordo ni por las herramientas del controlador, ya que los procedimientos operativos y de diseño no contemplan errores en el altímetro. Una alerta de altitud mínima de seguridad (MSAW) se activó en la torre, por la proximidad de la aeronave al terreno, pero el controlador usó una fraseología inadecuada al advertir a la tripulación, la cual no escuchó el mensaje y continuó el descenso.

Al no adquirir referencias visuales, se realizó una aproximación frustrada, habiéndose registrado una altitud mínima de solo 6 [ft] (2 [m]) a 0,9 [nm] del umbral, fuera de los límites del aeropuerto. El sistema de alerta y prevención del terreno (TAWS) del avión no se activó, y la tripulación no era consciente de la cercanía al terreno. Sin embargo, en la segunda aproximación, aún con el QNH erróneo, lograron contacto visual a más de 600 [ft] y aterrizaron sin incidentes.

La BEA emitió doce recomendaciones de seguridad (seis en el informe preliminar y seis en el informe final) para prevenir futuros incidentes similares. Además, la EASA emitió la SIB 2023-03 'Ajuste incorrecto del altímetro barométrico' con fecha del 9 de marzo de 2023.

Además, Mr Benoit Roturier perteneciente a la DGAC Francia se refirió en el “Regional Workshop on SBAS for Latin America” al incidente ocurrido en el aeropuerto de París,

además presentó un estudio realizado por la DSNA ante el incidente del QNH erróneo y el siguiente análisis:

En 2024 se realizó un estudio DSNA sobre los datos QNH registrados entre 2019 y 2023 en seis aeropuertos principales de Francia, que involucraron 1.694.266 vuelos durante este período. Donde se encontraron 2.269 casos de ajustes erróneos con una discrepancia mayor a 2 [hPa] en los datos base.

Como consecuencia, uno de los principales hallazgos de este estudio es que las estadísticas del riesgo de integridad de un ajuste incorrecto del QNH en el aterrizaje se encuentran en un nivel muy bajo, de 10^{-3} por aproximación, es decir 1 de cada 1.000 aterrizajes podría tener un error en el ajuste del QNH que no se detecte. Además, se evidenció un riesgo de 10^{-4} por aproximación de tener un ajuste incorrecto del QNH en el aire no detectado mayor que 10 [hPa] (es decir, un error vertical de 280 [ft]).

El TLS (nivel objetivo de seguridad) definido por la OACI es de 10^{-8} por aproximación. Para SBAS/GBAS el riesgo de integridad está diseñado en torno a los 10^{-7} por aproximación con el fin de cumplir con el TLS definido. Por lo tanto, **con BARO/VNAV el riesgo de integridad es reducido en un factor de 10.000.**

Además, expuso que un estudio reciente de EUROCONTROL que confirma los hallazgos del DSNA sobre el alto nivel de riesgo barométrico, donde se analizaron las operaciones de aterrizaje en 378 aeropuertos de la UE durante 31 días (lo que representó 747.353 vuelos). El estudio encontró 196 casos de ajustes incorrectos de QNH superiores a 5 [hPa], en 747.353 vuelos, lo que representa un riesgo de integridad mayor a 5 [hPa] del orden de 10^{-4} por aproximación.

Roturier recalca en su conclusión que la principal vulnerabilidad de los enfoques Baro/VNAV es su dependencia humana en el ajuste correcto del altímetro y la falta de barreras de seguridad adecuadas, además hace el siguiente llamado “Creemos que, con el

aumento planificado del tráfico a nivel mundial, ahora es necesario implementar enfoques SBAS y/o GBAS a nivel mundial para complementar la infraestructura ILS disponible”. Considerando este incidente, las alertas de seguridad emitidas por los diferentes organismos de la aviación y el análisis de la DGAC de Francia, es necesario evidenciar que por lo tanto existe un riesgo para los actuales procedimientos APV en Chile, es decir para las aproximaciones RNP AR, las cuales son desarrolladas en un aeropuerto al norte del país y en cinco aeródromos, todos aquellos de la Red Primaria, específicamente los que no cuentan con sistema ILS.

Tabla 3-3: Aeródromos y aeropuerto que utilizan un procedimiento de aproximación RNP AR.

		Ciudad	Nombre	ILS	Tipo de aproximación
Red primaria	Aeropuerto	Antofagasta	Andrés Sabella	NO	RNP AR
	Aeródromos	Calama	El Loa	NO	RNP AR
		La Serena	La Florida	NO	RNP AR
		Balmaceda	Balmaceda	NO	RNP AR
		Osorno	Cañal Bajo Carlos Hott Siebert	NO	RNP AR
		Puerto Natales	Teniente Julio Gallardo	NO	RNP AR

Fuente: Elaboración propia, con datos obtenidos de la Ilustración 3-1.

En la *Tabla 3-3*, se muestran los diferentes aeródromos que cuentan con esta aproximación, la cual puede sufrir complicaciones por errores en el ajuste del altímetro. Considerando que todos aquellos aeródromos son parte de la Red Primaria aeroportuaria, por lo cual transportan a un importante número de pasajeros durante el año.

Con información obtenida mediante la JAC, la cantidad de operaciones de aeronaves por transporte de pasajeros del 2024 de estos aeródromos se pueden visualizar en la *Tabla 3-4*. Donde el aeródromo El Loa ocupa el segundo puesto con mayor cantidad de operaciones comerciales, después del Ap. Arturo Merino Benítez con 164.259 operaciones. Seguido del aeródromo Andrés Sabella. El aeródromo de La Florida ocupa el sexto lugar a nivel nacional. Finalmente, los aeródromos de Balmaceda, Cañal Bajo y Teniente Julio Gallardo realizan menos de la mitad de las operaciones que los otros aeródromos mencionados, sin embargo, no dejan de ser cruciales para el transporte de los residentes de aquellas ciudades.

Tabla 3-4: Número de operaciones de aeronaves con actividad de transporte de pasajeros en 2024.

Ciudad	Nombre	N° Operaciones 2024
Calama	El Loa	17.935
Antofagasta	Andrés Sabella	17.289
La Serena	La Florida	13.737
Balmaceda	Balmaceda	4.069
Osorno	Cañal Bajo Carlos Hott Siebert	2.680
Puerto Natales	Teniente Julio Gallardo	1.896

Fuente: JAC.

Con estos datos se puede confirmar la importancia que tiene para las operaciones nacionales el reciente aviso de seguridad expuesto por las distintas organizaciones aeronáuticas sobre las operaciones con aproximaciones BARO/VNAV, donde hay un riesgo latente por errores de configuración del QNH, pudiéndose ver afectado distintos aeródromos de la red primaria nacional. Considerando que, si estos aeródromos contaran con un sistema de ayuda a la aproximación de precisión como ILS o SBAS/GBAS, no se verían afectados ya que los pilotos contarían con una guía vertical geométrica y no dependerían del altímetro.

3.2 Comparativa operacional entre sistema ILS, GBAS y SBAS

A continuación, se presentan las principales características operacionales, técnicas y/o económicas de los tres sistemas de precisión, con información obtenida de instituciones ligadas con la aviación y empresas fabricantes. Además, se evidencian las limitaciones para la implementación de un sistema de aumentación satelital, GBAS o SBAS, para las aproximaciones de precisión.

3.2.1 Instrument Landing System

“Un sistema de aterrizaje por instrumentos se define como un grupo de asistencia de navegación o aproximación de precisión para guiar de manera segura la aeronave hacia la pista. El Sistema de Aterrizaje por Instrumentos (ILS) es un instrumento de aviación de

precisión basado en haces de radio que proporcionan al piloto una guía lateral y vertical durante las etapas de aproximación y aterrizaje del vuelo”. (Aeroclass, 2022)

A continuación, se presentan los principales beneficios de este sistema, basándose en lo expuesto por Francisco (2024) sobre este sistema:

- **Precisión:** El sistema ILS ofrece una alta precisión en la guía tanto lateral como vertical, lo cual resulta fundamental para ejecutar aterrizajes seguros en condiciones meteorológicas adversas.
- **Seguridad:** Contribuye significativamente a la seguridad operacional al permitir aproximaciones controladas cuando la visibilidad es limitada, reduciendo así el riesgo de incidentes durante la fase crítica del aterrizaje.
- **Estándar internacional:** El ILS está estandarizado a nivel global y se encuentra instalado en numerosos aeropuertos alrededor del mundo, lo que facilita una navegación uniforme y confiable para aeronaves de distintas procedencias.

Por lo que, una de las principales ventajas operativas del ILS es su capacidad para mantener la continuidad de las operaciones aéreas frente a condiciones meteorológicas adversas. Al posibilitar aterrizajes seguros en situaciones de visibilidad reducida, según sea la categoría del ILS. Reduce la necesidad de desvíos o cancelaciones, minimizando así las demoras y mejorando la puntualidad de los vuelos.

Sin embargo, hay algunas desventajas claves de este sistema, así como sus áreas protegidas, ya que su infraestructura es terrestre y su cobertura, ya que solo está disponible para el cabezal donde fue instalado este sistema.

3.2.2 Ground Based Augmentation System

Según la Federal Aviation Administration, las principales características que tiene un sistema GBAS son las siguientes:

- Un solo sistema GBAS puede soportar múltiples pistas y aproximaciones en el aeropuerto donde está instalado. Los procedimientos individuales se publican a medida que se aproxima el sistema de aterrizaje GBAS (GLS), y cada aproximación tiene un identificador de número de canal único.
- La ubicación de GBAS elimina las áreas críticas que restringen el movimiento de aeronaves y equipos alrededor de un aeródromo, lo que puede mejorar la capacidad del aeropuerto en condiciones de baja visibilidad.
- La precisión demostrada de GBAS es inferior a 1 metro tanto en dirección vertical como horizontal.

Además, se recoge de la Guía para la implementación de sistemas de aumentación basados en tierra de la OACI, otras características claves, las cuales se detallan a continuación:

- Aproximación en curva: El GBAS permite el uso de aproximaciones en curva con guía tanto lateral como vertical. Esta capacidad es especialmente importante para crear procedimientos que eviten que las aeronaves vuelen sobre áreas específicas cercanas a aeropuertos, ya sea para reducir el ruido en zonas urbanas o para evitar obstáculos.
- Servicio de determinación de la posición: El servicio de determinación de posición del GBAS proporciona información sobre la posición horizontal, apoyando las operaciones RNAV dentro de su zona de cobertura. Esta característica mejora la precisión de la información de posición y permite reducir la separación entre aeronaves en el área terminal.

- Aproximación frustrada guiada: Esta característica, aunque no está definida en las SARP, puede ser proporcionada por el GBAS, mejorando así la seguridad durante las aproximaciones frustradas.

Durante el Regional workshop on SBAS for stakeholders across the LATAM region, José Vivas de COCESNA mencionó el siguiente punto con relación a GBAS, “Los resultados del análisis de interferencias fueron satisfactorios y no pone en riesgo la implementación del sistema en el aeropuerto de Belice. En referencia al sitio que es pantanoso el sistema GBAS es ideal ya que la información obtenida no depende del suelo sino de los satélites.” Lo cual reafirma la ventaja de este sistema frente a orografía compleja o cuando existe poco terreno para instalaciones en tierra.

3.2.3 Satellite-based Augmentation System

Para destacar las características más beneficiosas de este sistema de precisión satelital, se recogen los argumentos dados en el “Regional LATAM SBAS virtual workshop” realizado el 23 de septiembre de 2024, en el cual participaron diversas empresas e instituciones del rubro aeronáutico alrededor del mundo.

Según Mireira, de *INDRA* (proveedor español líder en soluciones propias en los mercados de transporte, tráfico aéreo y defensa), quién presentó “A Maximum Financial Benefit of SBAS”, las principales características que otorga este sistema son que permite a las aeronaves obtener su posición con niveles de precisión de menos de 1 metro, además de opciones de aterrizaje y navegación más flexibles.

Por otro lado, Olivier Autran, de la empresa *Thales Alenia Space*, recalcó que el SBAS ayuda a los satélites GNSS, promoviendo una guía más precisa y continua. Este sistema cuenta con aproximación CAT I, es decir similar al ILS, pero logra optimizar la aproximación final reduciendo así los riesgos en la etapa de vuelo considerada una de las más críticas. Por otro lado, da acceso a aeropuertos más pequeños que no contaban con ningún sistema de

aproximación y a la aviación de ocio, ya que, el sistema SBAS es capaz de cubrir un continente completo.

Además, Luis Cuervo en representación de la *European Commission*, señaló que el 97% de Europa utiliza EGNOS (SBAS europeo), recalcando que este se utiliza también en industrias como la agricultura, sectores marítimos, ferroviario e incluso en drones, ayudando a reducir sus costos al utilizar este sistema de precisión.

Durante el Regional workshop on SBAS for stakeholders across the LATAM region, Benoit Roturier, miembro de la DGAC Francia, presentó principales características del sistema SBAS:

- Permite operaciones de aproximación RNP hasta LNAV, LNAV/VNAV, LP y Mínimos de LPV.
- Proporciona orientación geométrica y no se ve afectado por la presión barométrica, las fluctuaciones de temperatura o los ajustes barométricos incorrectos.
- Potencial para reducir costos operativos.
- Proporciona la mejor capacidad PBN.
- Reduce la desviación cuando el ILS no está disponible.
- Mínimos más bajos para pistas no equipadas con ILS.
- Menores requisitos de carga de combustible y mayor confiabilidad de despacho.

Además, por su parte James Danga, hizo énfasis en que para las aerolíneas y usuarios del espacio aéreo hay reducción de eventos DDC (Retrasos, Desvíos, Cancelaciones) y beneficios en eficiencia de vuelo y reducción de CFIT. Por otro lado, genera un impacto socioeconómico inducido del SBAS en la sociedad: el ahorro de tiempo de los pasajeros y el impacto ambiental del SBAS.

En la *Ilustración 3-7*, se visualiza un resumen a modo de comparación de las principales características de estos sistemas, para una mejor comprensión de la información y clarificación de mejores ventajas.

Sistema / Característica	ILS	GBAS	SBAS
Cobertura	Entrega cobertura solo al cabezal de pista donde está instalado	Múltiples pistas atendidas por una misma instalación (dentro de un área de 23 nm).	Entrega cobertura a todas las pistas de un continente, en este caso Latinoamérica y Caribe
Asignación frecuencia	Cada ILS necesita una frecuencia específica, es problemático debido al número limitado de frecuencias.	Se utiliza la misma frecuencia VHF para todas las aproximaciones.	Utiliza las mismas frecuencias GNSS globalmente.
Interferencias y ruidos en la señal	Las curvas del haz causadas por interferencias reflectantes producen ruido en la señal de guiado, pudiendo afectar a la aproximación.	Aproximación más estable, inexistencia de curvas del haz, por lo tanto, disminuye el ruido.	Aproximación curva para acortar la aproximación o evitar zonas sensibles al ruido.
Requisitos emplazamiento	Requiere un terreno nivelado y áreas despejadas en la pista.	Ubicación flexible y sencilla en el aeropuerto, no es necesario colocar los receptores GBAS cerca de una pista, ni en una geometría específica.	Utiliza satélites GEO, RIMS, estaciones NLES y MCC, los cuales pueden estar repartidos por el continente.
Existencia áreas críticas	Si. Por lo tanto, reduce el área de pista.	Elimina los requisitos de áreas críticas de protección contra interferencias de señal, optimizando uso de pista.	No requiere áreas críticas, optimiza el uso de la pista.
Flexibilidad aproximaciones	Limitada. Se basan solo en características del ILS instalado.	Alta. Múltiples pendientes de planeo, umbrales y desplazamientos según requerimientos del piloto.	Más flexibles las pistas para las que pueden diseñarse procedimientos, permitiendo realizar aproximaciones a extremos de pista.

Ilustración 3-7: Comparativa de las características principales de los sistemas ILS, GBAS y SBAS.

Fuente: Elaboración propia.

Se puede apreciar de la *Ilustración 3-7*, las cruciales diferencias entre cada sistema. La más relevante en la aviación y para esta investigación es la aproximación a múltiples pistas, ya que el ILS solo considera la pista en donde fueron instaladas sus antenas, el GBAS considera un radio de 23 nm para realizar aproximaciones y el SBAS considera todo un continente con este sistema para la aproximación de aeronaves, lo cual se reduce en que sus costos serán inferiores a los otros sistemas y compartidos entre países del mismo continente, siendo una ventaja comparativa significativa para la aviación.

Con relación a lo anterior, si bien, se ha mostrado que GBAS y SBAS son potencialmente mejores sistemas de precisión que el ILS. Cabe mencionar que para cubrir todos los aeródromos de Chile con GBAS se necesitaría instalar en cada ciudad que cuente con aeródromo, priorizando los que no tengan ILS, lo cual sería un costo elevado de inversión. Por otro lado, en el caso del SBAS, solamente se necesita recurrir a instalar distintas estaciones de referencia (en todo el continente) e incorporar una carga útil a un satélite geostacionario (todo aquello compartido entre todos los países de Latinoamérica y el Caribe), por lo que el costo también es compartido, reduciendo así la inversión y cubriendo todos los aeródromos de Chile, públicos y privados incluso llegando hasta la Antártica.

Otro punto clave es que el ILS no entrega flexibilidad en sus aproximaciones, en cambio, GBAS y SBAS cuentan con procedimientos dependiendo de los requerimientos que se tengan, conduciendo a aproximaciones finales más cortas y disminuyendo los riesgos en esta fase final.

Para evaluar las ventajas relativas de los sistemas ILS, GBAS y SBAS, se utiliza el Enfoque de Análisis de Decisiones Multicriterio (MCDM), y en particular su subcategoría MADM (Multi-Attribute Decision Making). En este caso, se aplicó una versión simple del método de puntuación por atributos, asignando valores en una escala del 1 al 3 según el beneficio relativo que ofrece cada sistema en relación con cada característica. A continuación, se define cada nivel de la escala mencionada.

- Nivel 1 – Bajo beneficio relativo: El sistema ofrece un aporte limitado en relación con la característica evaluada. Su impacto es marginal o solo útil en condiciones muy específicas.
- Nivel 2 – Beneficio moderado: El sistema proporciona un nivel aceptable de beneficio. Su desempeño es funcional y cumple con los requisitos operativos en la mayoría de los escenarios, aunque puede no ser el más eficiente o avanzado en comparación con otras opciones.
- Nivel 3 – Alto beneficio relativo: El sistema destaca por ofrecer un beneficio considerable en la característica evaluada. Su implementación representa una mejora clara y significativa, con un impacto positivo directo en la eficiencia, seguridad u operatividad general.

Esta comparativa con cada característica y su nivel de la escala correspondiente se expone en la *Tabla 3-5*.

Tabla 3-5: Comparación Multicriterio de ILS, GBAS y SBAS.

Sistema / Característica	ILS	GBAS	SBAS
Cobertura	1	2	3
Asignación de frecuencia	1	2	3
Interferencias y ruidos en la señal	1	3	3
Requisitos emplazamiento	1	2	3
Existencia áreas críticas	1	2	3
Flexibilidad aproximaciones	2	3	3
Total	7	14	18

Fuente: Elaboración propia.

Según los resultados obtenidos del análisis multicriterio de la *Tabla 3-5*, se evidencia que el sistema ILS es el que presenta mayores desventajas comparativas. Su cobertura está restringida al cabezal de pista, requiere una frecuencia específica por cada aproximación, es

altamente sensible a interferencias y necesita condiciones físicas estrictas para su emplazamiento, lo que incrementa sus costos y limita su aplicabilidad.

En una posición intermedia se encuentra el GBAS, que mejora varios aspectos respecto al ILS, especialmente en términos de estabilidad de señal, menor susceptibilidad a interferencias y capacidad para aproximaciones más flexibles. Sin embargo, su alcance sigue siendo local, ya que depende de una instalación en tierra en cada aeropuerto.

Por el contrario, el sistema SBAS se posiciona como la opción más ventajosa. Ofrece cobertura a nivel continental, utiliza infraestructura satelital en lugar de instalaciones locales, permite una operación más flexible y elimina las áreas críticas. Estas características lo convierten en el sistema más eficiente y versátil entre los comparados.

3.3 Análisis aproximado de costos y beneficios económicos de SBAS y GBAS.

Un tema crucial al momento de recomendar un sistema para la ayuda a la aproximación son los costos que conlleva y los beneficios y/o ahorros que traería consigo. A continuación, se desglosa un análisis de los costos del sistema actual en Chile y posteriormente que costos aproximadamente tendría la implementación de GBAS o SBAS.

3.3.1 Costos del sistema de ayuda a la aproximación ILS en Chile

A mayo de 2025, Chile cuenta con siete aeródromos/aeropuertos con el sistema ILS CAT I, además de tres recintos con ILS CAT IIIB. Donde según su categoría va variando el costo de implementación. Es un sistema de aproximación que no solo tiene un costo de inversión, el cual ronda entre los 8 a 10 millones de dólares según (Seremi MOP Aysén, 2024), además cuenta con costos de mantención y operación. Como ejemplo, se tiene la implementación del ILS CAT IIIB en el aeródromo Carriel Sur el cual tuvo un costo de inversión de 10 millones de dólares, señaló TallyHo (2018).

La incorporación de este sistema a los aeródromos del país se realiza mayoritariamente mediante licitaciones. Para el caso del aeropuerto de Santiago de Chile, la adquisición fue en abril de 2018, mediante importación directa, de un Sistema de Radioayuda ILS/DME CAT III, bajo modalidad llave en mano, esto es, instalado, funcionando y comisionado en el Aeropuerto Arturo Merino Benítez, tuvo un monto de US\$1.437.764, adjudicado por la empresa *INDRA*. (Mercado Público, 2018)

Como los sistemas que se han estado investigando entregan un símil al ILS CAT I, es importante conocer el costo de este en Chile. Para esto no se encontraron ficha de licitación con el valor de adquisición de este sistema, por lo que se ocuparon valores obtenidos de la (Dirección General de Aeronáutica Civil, 2020), donde se señala el valor estimado en UF del sistema ILS en los distintos aeródromos. En el caso de los que cuentan con ILS CAT I, el valor estimativo es de 14.303 UF. Para obtener el valor de los trabajos civiles necesarios, se utiliza la Ficha Licitación sobre la “Contratación de obras civiles para instalación de equipos de sistema ILS en el Aeropuerto Diego Aracena”, donde el monto fue de 36.176.000 CLP. (Mercado Público, 2013).

Por lo tanto, para obtener valores actuales, se utiliza el valor de la UF del 30 de mayo 2025 obtenida del SII, la cual es de 39.186,92 CLP. El monto de las obras civiles se actualiza respecto al IPC, donde en base a la calculadora IPC, se obtiene que de julio 2013 a abril 2025, hay un aumento de un 70,6%. Estos cálculos se encuentran plasmados en la *Tabla 3-6*.

Tabla 3-6: Montos del sistema ILS CAT I y las obras civiles para su implementación, en pesos chilenos.

	Monto en peso chileno
Sistema ILS CAT I	\$560.490.517
Obras civiles	\$61.716.256
Total	\$622.206.773

Fuente: Elaboración propia, con datos mencionados anteriormente.

Por lo tanto, el valor aproximado de la implementación de un sistema ILS CAT I y las obras civiles respectivas en una pista del país actualmente tiene un costo aproximado de 622.206.773 CLP.

Por otro lado, se debe considerar el mantenimiento preventivo de este sistema, el cual se tiene de dos tipos. Está el mantenimiento mensual el cual tiene una duración 2 [hr] (24 [hr]/ [año]) y el mantenimiento anual, el cual dura aproximadamente 100 [hr]. Para ambos mantenimientos se necesitan normalmente 4 electrónicos aeronáuticos, por lo tanto, para obtener el valor de este mantenimiento se calcula en base a la hora hombre. El valor del salario mensual de un electrónico aeronáutico se obtiene de la página de la DGAC Chile, en Transparencia Activa.

$$\text{Hora hombre: } \frac{\text{Salario mensual}}{\text{Horas trabajadas mensual}} = \frac{2.284.952[\$]}{176[\text{hr}]} \approx 12.983 \left[\frac{\$}{\text{hr}} \right]$$

$$\text{Mantenimiento mensual al año (4 electrónicos): } 4 \times \left(24[\text{hr}] \times 12.983 \left[\frac{\$}{\text{hr}} \right] \right)$$

$$\approx \mathbf{3.988.320 \text{ CLP}}$$

$$\text{Mantenimiento anual (4 electrónicos): } 4 \times \left(100 [\text{hr}] \times 12.983 \left[\frac{\$}{\text{hr}} \right] \right) \approx$$

$$\mathbf{5.193.200 \text{ CLP}}$$

Considerando los cálculos anteriores, el **valor aproximado total del mantenimiento en un año de un sistema ILS es de 9.181.520 CLP**. Es una aproximación de los costos ya que también puede ocurrir que falle el sistema, donde se puede necesitar reparación de algún equipamiento y/o compra de un repuesto lo que aumentaría el valor.

Otro valor para considerar es el servicio de mantenimiento de antenas de sistema ILS trayectoria de planeo, estos contratos con licitación se realizan normalmente de manera anual, por ejemplo, el año 2022 este servicio tuvo un valor de 6.265.530 CLP, lo cual se llevará a valor actual (abril 2025), por lo que el **servicio de mantenimiento para antenas del ILS tiene un valor aproximado de 7.393.325 CLP anual**.

La suma de estos tres tipos de mantenimientos al año para un sistema ILS CAT I da un valor aproximado de **16.574.845 CLP**.

3.3.2 Costos de un sistema GBAS

Con relación a los costos asociados normalmente entre un ILS y un sistema GBAS, se evidencia que a largo plazo es más rentable un sistema de aproximación GBAS. Esto se puede comprobar en la *Ilustración 3-8* que muestra un análisis de costos de un aeródromo de Portugal, realizado por Oliveira, Silva, et al.

ILS CAT I installation costs	Price [€]	GBAS Cat I Installation costs	Price [€]
DME and ILS CAT I infrastructure	336 000	Infrastructure	500 000
Installation and commissioning	175 000	Installation and commissioning	120 000
Civil works	195 000	Civil works	44 000
Calibration	30 000	Initial flight certification	30 000
Operation costs (per year)	79 000	Operating costs (per year)	43 000

Ilustración 3-8: Costos asociados al sistema ILS y GBAS.

Fuente: A Comparative Study between ILS and GBAS Approaches: The Case of Viseu Airfield, Oliveira et al, December 2020.

Analizando la *Ilustración 3-8* se puede extraer que solamente el costo de la infraestructura del GBAS es más costoso que el ILS, todos los demás costos como de instalación y de trabajos civiles son inferiores en al menos 55.000 €. Incluso, el costo más relevante, el cual es el mantenimiento del sistema, tiene una gran diferencia de valores en cada sistema, evidenciando que con el sistema GBAS se estaría ahorrando un **45,6% cada año**.

Para analizar los costos de GBAS, se toman como base los valores de la *Ilustración 3-8* y se realiza la conversión de la moneda euro a Peso chileno, utilizando el cambio del día 30 de mayo de 2025, el cual tiene un valor de \$1.066,65, según el Banco Central de Chile.

Tabla 3-7: Comparativa de costos de implementación entre ILS y GBAS en pesos chilenos.

ILS CAT I	Precio	GBAS CAT I	Precio
Infraestructura DME e ILS CAT I	\$ 358.394.400	Infraestructura	\$ 533.325.000
Instalación y puesta en servicio	\$ 186.663.750	Instalación y puesta en servicio	\$ 127.998.000
Trabajos civiles	\$ 207.996.750	Trabajos civiles	\$ 46.932.600
Calibración	\$ 31.999.500	Certificación inicial de vuelo	\$ 31.999.500
Costos de operación (anual)	\$ 84.265.350	Costos de operación (anual)	\$ 45.865.950
Total	\$ 869.319.750	Total	\$ 786.121.050

Fuente: Elaboración propia, con datos obtenidos de la Ilustración 3-8.

Se puede evidenciar en la *Tabla 3-7* que se obtiene una diferencia de 83.198.700 CLP, siendo GBAS más económico que el ILS en sus costos de implementación más un año de costo de operación. Donde se puede evidenciar que la disminución más notoria es en los costos de trabajos civiles, esto significa un ahorro en un 77,4% del valor actual del ILS. Por ende, con este ejemplo para el análisis de implementación de un sistema GBAS, se obtiene un ahorro total significativo de un 9,6 %.

3.3.3 Costos de un sistema SBAS

En el caso de implantar un SBAS para Chile, se estaría considerando todo el continente, es decir América latina y Caribe, por lo que existe una mayor rentabilidad del proyecto, ya que, se reparten los costos entre los países. En línea con aquello, la inversión que se debe realizar es para la certificación y regulación de autoridades aeronáuticas, costos de homologación y pruebas de seguridad.

Santiago Soley, experto en SBAS de la EASA, presentó en el “Regional workshop on SBAS for stakeholders across the LATAM región”, un análisis de costo beneficio para la propuesta de implementación en la región de Latinoamérica y el Caribe, donde dividió los costos en: **CAPEX**; costos relacionados con inversiones a largo plazo en infraestructura, como satélites,

estaciones terrestres y desarrollo de sistemas, y **OPEX**; considerando los costos de operación, mantenimiento y prestación de servicios, como personal, supervisión y software.

Soley expuso que el costo de **CAPEX sería de US 300 M y de OPEX de US 50 M por año**. Además, se considera que el CAPEX inicial se distribuye a lo largo de varios años (5 - 10 años) y ambos costos se solaparían durante algunos años.

Para aquello se consideran datos de 17 países de esta región, como se puede visualizar en la *Ilustración 3-9*, exceptuando a México, ya que este no se encuentra dentro de los países de América Latina y Caribe. Los países restantes, los cuales cuentan con menos operaciones, se agrupan en la fila denominada “Rest”.

Country	Movements 2024	Movements 2023	Movements GA and Military 2023	Movements GA and Military 2023 (%)
Brazil	2.459.505	2.226.531	412.575	18,53%
Mexico	1.961.302	1.842.295	421.432	22,88%
Colombia	1.138.560	1.020.897	196.030	19,20%
Argentina	517.503	491.085	146.850	29,90%
Peru	491.912	414.065	89.743	21,67%
Puerto Rico	406.877	382.585	69.122	18,07%
Chile	260.580	229.629	18.813	8,19%
Dominican Republic	177.962	168.058	28.051	16,69%
Panama	154.528	143.034	6.309	4,41%
Ecuador	153.134	148.225	42.947	28,97%
El Salvador	123.007	120.633	70.753	58,65%
Bolivia	N/A	N/A	N/A	N/A
Costa Rica	91.919	88.714	4.557	5,14%
Honduras	N/A	57.595	0	0,00%
Bahamas	70.716	66.748	27.883	41,77%
Jamaica	67.518	63.062	12.920	20,49%
Trinidad and Tobago	47.300	41.149	10.205	24,80%
Paraguay	N/A	53.603	41.813	78,00%
Rest	492.805	635.758	149.384	23,50%
TOTAL	8.861.369	8.193.666	1.749.387	21,35%

Ilustración 3-9: Países y sus respectivas operaciones en 2023 y 2024.

Fuente: Soley, 2025.

Para la implementación de un sistema SBAS, los costos anteriormente mencionados se reparten entre los países de la *Ilustración 3-9*, **exceptuando a México**.

Para obtener un monto aproximado que debería aportar Chile se va a prorratar el monto obtenido del Capex por los países mencionados, considerando sus movimientos del año 2023. Para el caso de Bolivia se ocupará el número de movimientos del año 2019, el cual es de

104.574. Se obtiene el porcentaje de participación de cada país y después aquel porcentaje se multiplica por los US 300 M.

Tabla 3-8: Porcentaje de participación y monto en la inversión de SBAS por cada país de la región.

País	Movimientos 2023 (Bolivia 2019)	Porcentaje de participación	Monto aproximado de participación en CAPEX (USD)	Monto aproximado de participación en OPEX (USD)
Brasil	2.226.531	34,49%	\$103.464.218	\$17.244.036
Colombia	1.020.897	15,81%	\$47.439.856	\$7.906.643
Argentina	491.085	7,61%	\$22.820.129	\$3.803.355
Perú	414.065	6,41%	\$19.241.103	\$3.206.850
Puerto Rico	382.585	5,93%	\$17.778.265	\$2.963.044
Chile	229.629	3,56%	\$10.670.583	\$1.778.431
República Dominicana	168.058	2,60%	\$7.809.453	\$1.301.576
Panamá	143.034	2,22%	\$6.646.618	\$1.107.770
Ecuador	148.225	2,30%	\$6.887.837	\$1.147.973
El Salvador	120.633	1,87%	\$5.605.670	\$934.278
Bolivia	104.574	1,62%	\$4.859.428	\$809.905
Costa Rica	88.714	1,37%	\$4.122.433	\$687.072
Honduras	57.595	0,89%	\$2.676.370	\$446.062
Bahamas	66.748	1,03%	\$3.101.699	\$516.950
Jamaica	63.062	0,98%	\$2.930.415	\$488.403
Trinidad y Tobago	41.149	0,64%	\$1.912.145	\$318.691
Paraguay	53.603	0,83%	\$2.490.867	\$415.144
Países restantes	635.758	9,85%	\$29.542.910	\$4.923.818
Totales	6.455.945	100%	\$ 300.000.000	\$50.000.000

Fuente: Elaboración propia, con datos obtenidos de la Ilustración 3-9.

En la *Tabla 3-8* se puede evidenciar, posterior a los cálculos de prorrateo, que el monto asociado a **Capex**, de inversión, para Chile es de un **aproximado de US 10.670.583** y el monto de **Opex es de US 1.778.431**. Estos valores se convierten a peso chileno, para un mejor entendimiento, considerando el tipo de cambio al 30 de mayo 2025, el cual es de \$937,37. Para lo cual se obtienen los siguientes resultados.

CAPEX para Chile: 10.002.284.827 CLP

OPEX para Chile: 1.667.047.471 CLP

Se debe considerar que idealmente SBAS, como es un sistema de aumentación del GNSS, sirve de ayuda de precisión para otras industrias, principalmente para la marítima, agricultura, ferroviaria o minera, como lo hace actualmente EGNOS, por lo que los costos se podrían repartir dentro de los países por las distintas industrias interesadas. Lo que ya reduciría el costo para la industria de la aviación, dividiéndolo en 5 sectores distintos.

Por otro lado, Mireira Colina de la empresa *INDRA*, expuso en el “Regional LATAM SBAS Virtual Workshop”, qué los principales beneficios económicos del SBAS son: El rendimiento de un aeropuerto aumenta en hasta un 25%, esto se produce ya que las operaciones tardan menos, es decir como las aproximaciones son más efectivas, hay una mayor cantidad de aproximaciones por hora, lo que conlleva al aumento del rendimiento en un aeropuerto. En el caso de Chile, se toma como ejemplo las operaciones totales del 2023 en los aeródromos y aeropuertos del país, obtenidas de la JAC, las cuales fueron de 513.865 (aterrizajes y despegues). Por lo tanto, las operaciones totales aumentarían a un total de 642.331 operaciones si el rendimiento del aeropuerto incrementa en un 25%, es decir un aumento de 128.466 operaciones en un año, lo cual generaría potenciales nuevos ingresos para el país.

Según (Thales Alenia Space, 2023), “en todas las regiones en las que se ha estudiado, y recientemente en África y Australia, el Análisis Coste-Beneficio ha sido siempre muy positivo, alcanzando un Retorno de la Inversión de entre 5 y 8 años, y justificando que el SBAS no era un coste único **sino una inversión**”.

Para cerrar este capítulo de costos se realiza un resumen de los montos obtenidos, como se evidencia en la *Tabla 3-9*. En el caso del ILS CAT I, se tomó en consideración los costos para la implementación en los 7 aeródromos de la red primaria que no cuentan con este sistema, además 1 año de mantención. Para el caso de GBAS, igualmente se multiplicaron los montos por 7, sin embargo, se debe considerar que este sistema tiene una cobertura de 23 millas náuticas, por lo que en algunas regiones quedarían cubiertos 2 aeródromos, por

ejemplo, en Coquimbo, se puede cubrir el Ad. de La Florida y el Ad. Las Tacas, ya que tienen una distancia de 13,5 [nm]. En el caso de SBAS, el valor mencionado cubre a los 312 aeródromos de la Red Aeroportuaria Nacional, donde hay 302 que no cuentan con sistema ILS.

Tabla 3-9: Comparativa de costos de implementación y mantenimiento de ILS CAT I, GBAS y SBAS.

	Costos de sistemas de aumentación de precisión		
	ILS CAT I (7)	GBAS	SBAS
Implementación sistema	\$4.355.447.411	\$5.181.785.700	\$10.002.284.827
Mantenimiento anual	\$116.023.915	\$321.061.650	\$1.667.047.471
Total	\$4.471.471.326	\$5.502.847.350	\$11.669.332.298

Fuente: Elaboración propia, con los datos mencionados en el apartado 3.3.

Si bien la implementación del ILS CAT I en 7 recintos es la opción de menor costo, los otros dos sistemas cubren más aeródromos, incluso por aproximadamente el triple del valor del ILS, el sistema SBAS cubre todos los aeródromos de Chile, lo cual el ILS cubriría solo 21 de 312 aeródromos. El sistema GBAS tiene un valor similar al ILS y no alcanza a cubrir todos los aeródromos por región por su cobertura.

3.4 Propuesta del sistema óptimo para Chile y etapas clave a considerar

Considerando toda la información recopilada y analizada en esta investigación acerca de los beneficios, costos y limitaciones del Ground-Based Augmentation System y del Satellite Based Augmentation System. El sistema que trae consigo impactos económicos positivos, mayores beneficios y menores costos y/o limitantes es el **SBAS**. Se considera prioritariamente, que este sistema ya se encuentra apto y compatible con los receptores desplegados en las aeronaves, además de encontrarse corregidos sus errores con la ionosfera, como planteó (Thales Alenia Space, 2023).

La elección del sistema SBAS como la mejor alternativa para Chile se fundamenta en su cobertura, rentabilidad y eficiencia operativa. Con relación a la rentabilidad, en la *Ilustración 3-10* se expone como ejemplo el análisis económico del sistema SBAS africano (ANGA), donde se estima una recuperación de la inversión en tan solo cinco años (2027), con un retorno sobre la inversión (ROI) del 110 %, una tasa interna de retorno (E-IRR) del 28 %, y un valor presente neto (E-NPV) de 402 millones de dólares hacia 2045. Estos indicadores reflejan no solo la viabilidad financiera del sistema, sino también su capacidad para generar beneficios sostenidos a largo plazo.

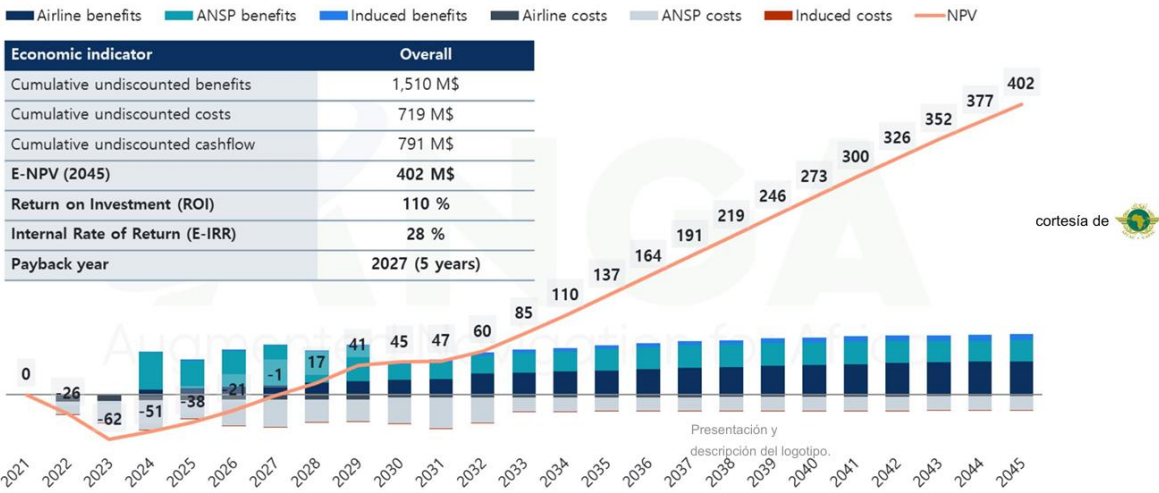


Ilustración 3-10: Análisis de rentabilidad de ANGA en África.

Fuente: Lapie, Regional workshop on SBAS for Latin America stakeholders, 2025.

También, Lapie expone unos indicadores de beneficios para aerolíneas y usuarios del espacio aéreo en África, específicamente en Reducción de eventos DDC: menos retrasos, desvíos y cancelaciones. Mayor eficiencia en el vuelo y reducción del riesgo de accidentes CFIF.

Indicadores económicos:

- ROI (retorno sobre la inversión): **545%**
- FIRR (tasa interna de retorno financiera): **36%**
- VPN (valor presente neto): **≈ 287 millones de dólares.**

Evidenciando así que el sistema SBAS es capaz de obtener beneficios al disminuir las cancelaciones, retrasos y desvíos.

Se descarta el GBAS considerando que sus errores ocasionados por la ionosfera aún no se encuentran resueltos, además que al realizar la investigación sobre ciudades alrededor del mundo que ocupen este sistema, aparecía una baja cantidad, en este caso se obtuvo información solo del Aeropuerto Internacional de Sídney-Kingsford Smith y del aeropuerto de Málaga-Costa del sol. Otro punto para mencionar es el similar costo de inversión con relación al ILS, de 5.181.785.700 CLP, donde se contabilizan solo los 7 aeródromos de la Red Primaria que no cuentan con ILS, dejando de lado el resto de los aeródromos de la Red Secundaria y de pequeños aeródromos, ya que no se puede considerar una gran cantidad de aeródromos en una primera inversión.

Por ende, con SBAS los 312 aeródromos del país, tanto públicos, privados o militares contarían con la tecnología de este sistema de aumentación basado en satélites, lo cual amenizará la aproximación a todas estas aeronaves, logrando realizar aproximaciones más flexibles y precisas, con menores tiempos de vuelo. Incluso, según Colina de INDRA, las transmisiones entre el controlador y el piloto se disminuyen en un 30%.

En el caso de los 11 aeropuertos y/o aeródromos que ya cuentan con ILS, e incluso algunos con CAT-IIIB, el SBAS llegaría en primera instancia como apoyo al ILS, ya que SBAS hace el símil de CAT-I, por ende, en algunos aeropuertos si es necesaria la categoría más alta del ILS en días de baja visibilidad. En un futuro, solo se trabajará con SBAS ya que es el sistema más utilizado a nivel mundial, incluso en otras industrias como la minera o marítima.

3.4.1 Recomendaciones para la propuesta de implementación

A continuación, se abordan recomendaciones con relación a el marco regulatorio y organizativo necesario para la implementación de un sistema SBAS en Chile, tomando como referencia experiencias internacionales, especialmente en África y Europa. Se analizan los

pasos institucionales, técnicos y de cooperación regional requeridos, así como el potencial multisectorial del sistema en el contexto nacional.

Regulación:

Primeramente, para el análisis de viabilidad de implementación de un SBAS en Latinoamérica y Caribe, idealmente como se ha realizado en otras ocasiones, se debe realizar un *Test Bed*. Por lo que Chile debe manifestar su interés en este sistema para poder realizar una demostración real en uno de sus aeródromos, además, Olivier Autran de Thales Alenia Space afirma que esta demostración puede tener financiamiento europeo, así como lo hicieron para el sistema SBAS africano para sus estudios de Costo-Beneficio y las demostraciones para helicópteros y aeronaves. Ya que EGNOS es uno de los sistemas que se ha ido ampliando hacia otros continentes esto porque uno de los principales puntos es la cooperación internacional del sistema y que se pueda ocupar en todo el mundo. Por lo que es una gran oportunidad de evidenciar las ventajas de este sistema de aumentación de precisión que beneficiaría tanto a la aviación comercial como la general.

Esta propuesta, basada en las intervenciones realizadas por representantes de la European Commission durante el “Regional LATAM SBAS Virtual Workshop”, contempla una hoja de ruta para avanzar en la implementación regional de un sistema SBAS (Satellite-Based Augmentation System) en América Latina.

Fase 1: Coordinación inicial

- Convocatoria: Reunir a las autoridades competentes de cada país involucrado.
- Consenso multilateral: Alcanzar un acuerdo entre todas las partes, priorizando el apoyo político, técnico e industrial.

Mientras más países se adhieran al sistema, mayor será la rentabilidad del proyecto y más equilibrada la distribución de costos. Se puede avanzar mediante esquemas de colaboración: G2G (Gobierno a Gobierno) o B2B (Empresa a Empresa).

Fase 2: Diseño y planificación

- Cuantificación: Estimar costos, beneficios, cobertura y alcance del sistema.
- Evaluación tecnológica: Determinar requerimientos técnicos, compatibilidades e infraestructura necesaria.

Fase 3: Alineamiento institucional

- Obtención de respaldo institucional: Involucrar formalmente a los gobiernos e instituciones clave (autoridades aeronáuticas, agencias espaciales, etc.).
- Definición de modelo de gobernanza: Establecer marcos de regulación, certificación y control conjunto.

Fase 4: Implementación técnica

- Homologación y certificación: Inversión conjunta en procesos de validación técnica, certificación y pruebas de seguridad del sistema.
- Instalación de infraestructura: Conexión de carga útil al satélite geoestacionario SBAS. Implementación de estaciones de referencia RIMS distribuidas estratégicamente en la región.

Para el caso de implementación de SBAS en África (ANGA), James Danga expone en el “Regional Regional workshop on SBAS for stakeholders across the LATAM region” que el análisis costo/beneficio y las pruebas realizadas fueron totalmente financiadas por la Unión Europea. Además, recalca los puntos claves de la segunda fase de la implementación.

- **Gobernanza y organización:** Para definir funciones dentro del programa e identificar roles para las partes interesadas clave.
- **Regulación y supervisión:** Para definir el marco regulatorio y de estandarización general, incluida la certificación.
- **Financiación:** Para identificar las necesidades de financiación.
- **Prestación de servicios:** Definir los esquemas de prestación de servicios y responsabilidad.

Según Soley (conferencia, 2025), el despliegue de un sistema SBAS requiere la participación de actores industriales capaces de diseñar e implementar la tecnología:

- El componente espacial podría estar disponible a través de proveedores de satélites privados, como Viasat o Eutelsat.
- El componente de tierra requiere un esfuerzo de ingeniería a largo plazo:
 - En Europa, la Agencia Espacial Europea fue la encargada de supervisar el desarrollo industrial de EGNOS, el cual es propiedad de ciudadanos de la Unión Europea. La Comisión Europea asumió la propiedad de la infraestructura EGNOS de la Agencia Espacial Europea (ESA) en nombre de la Unión Europea el 1 de abril de 2009. Desde el 1 de enero de 2014, la Comisión Europea delegó plenamente la explotación de EGNOS en EUSPA. (EUSPA, 2025)
 - En África, se ha creado una Oficina de Programa Conjunto (JPO) para apoyar la gestión de proyectos regionales. La gobernanza se trata de un modelo centralizado híbrido bajo la Unión Africana (African Union), donde se combinan decisiones políticas a nivel continental con nodos regionales de operación.

Los servicios de navegación aérea suelen prestarse a nivel nacional a través de proveedores de servicios públicos.

- Mientras que en Estados Unidos la provisión de SBAS está a cargo de la Autoridad Nacional (FAA), en Europa se creó una nueva entidad denominada ESSP con la participación de accionistas de diferentes Proveedores de Servicios de Navegación Aérea nacionales.
- Es necesario modificar las regulaciones aplicables para la prestación de servicios ATM/CNS para asegurar el servicio, aprobación y certificación de disposiciones
- En Europa, la EASA ha desarrollado un reglamento ATM/ANS 2017/373 único (UE) para supervisar la prestación de servicios de navegación aérea. Servicios, también aplicables a servicios basados en satélite.

Por lo tanto, para lo anteriormente expuesto, en el caso de Chile, la autoridad competente que fiscaliza y regula la aviación del país es la Dirección General de Aeronáutica Civil, por lo que es necesario que esta autoridad entre en conversaciones con las autoridades de los demás países de la región de América Latina y Caribe para definir funciones y roles para la implementación. Además, idealmente se debe incentivar a las otras industrias líderes del país, como la agricultura, la minería, la ferroviaria, a interesarse por la utilización de este sistema, para que así el costo sea repartido.

Por otro lado, se necesitaría crear una entidad como en Europa con la ESSP, para que opere y preste estos servicios a toda la región, ya que no existe una entidad para ese fin actualmente en la región. Sin embargo, la Comisión Latinoamericana de Aviación Civil (CLAC), es el principal organismo regional que agrupa a la mayoría de los países de América Latina y el Caribe. Está encargado de coordinar políticas, promover la cooperación entre autoridades aeronáuticas y armonizar regulaciones aeronáuticas en la región. Está compuesto por 22 estados de América Latina y el Caribe. Este organismo es crucial para poder mediar en las conversaciones posteriores para la implementación de este sistema SBAS.

SBAS en otras industrias

Además de beneficiar a Chile, este sistema ayuda a todo el continente, es decir Centroamérica y Sudamérica. Por otro lado, propone beneficios para otros rubros fuera de la aeronáutica, basándose en lo descrito por (Thales Alenia Space, 2023), este sistema puede ayudar en el sector ferroviario, el cual últimamente ha estado en constante evolución dentro del país, siguiendo esta misma línea “El Directorio de CAF -banco de desarrollo de América Latina y el Caribe aprobó un préstamo de hasta USD 500 millones en favor de la Empresa de los Ferrocarriles del Estado (EFE) de Chile, para contribuir a financiar la expansión y modernización de la red ferroviaria del país” (Banco del desarrollo de América Latina y el Caribe, 2024). Por lo tanto, la inclusión de un SBAS aportaría ayuda para mejorar la señalización, que sea más segura y eficiente, ayudando con una localización más precisa del tren y prevenir colisiones.

Otro sector importante por destacar en Chile es el rubro de la agricultura. “El PIB del sector agrícola en Chile aumentó a 2495 mil millones de CLP en el primer trimestre de 2025 desde 2125.27 mil millones de CLP en el cuarto trimestre de 2024. Esta es la mayor actividad en el sector desde el primer trimestre de 2024. En términos anuales, la producción agrícola aumentó un 5.2%.” (TRADING ECONOMICS, s.f.). SBAS aporta beneficios y precisión a este sector, estos se ven ejemplificados con EGNOS, el cual, con su alta precisión, es una solución asequible para la agricultura de precisión, permitiendo mejorar el control de las cosechas, optimizar la recopilación de datos, trabajar en condiciones adversas, aumentar la productividad, reducir costos y minimizar el impacto ambiental con baja inversión.

Con esta propuesta de implementar SBAS para Chile, el cual ofrece una guía geométrica similar a la del ILS, incrementa considerablemente la seguridad de la navegación aérea, en particular durante las fases de aproximación de las aeronaves, una de las fases más riesgosas para la aviación alrededor del mundo. Cabe recordar además que el SBAS mejora la seguridad operacional al ofrecer guía vertical, al igual que el ILS, lo que permite realizar aproximaciones más estables y seguras. A su vez, puede generar importantes eficiencias operacionales al habilitar procedimientos de precisión en aeropuertos que actualmente no cuentan con este tipo de sistemas. Este aspecto también puede ser considerado dentro de un business case más detallado y específico, orientado a la autoridad aeronáutica o a alguna aerolínea interesada.

Al ser una región con condiciones meteorológicas a veces muy adversas, la seguridad del transporte aéreo es un interés real para Chile. Además, como se mencionó anteriormente, este sistema puede entregar precisión a otras industrias, como la agricultura, ferroviaria y minera, las cuales están en un constante crecimiento en el país.

3.4.2 Retrofit de las aeronaves con sistema SBAS

Un punto importante para considerar es la actualización de las aeronaves para la utilización de este sistema. Como se ha mencionado anteriormente en esta investigación, el sistema SBAS es similar al ILS, en precisión e interacción con el piloto.

En donde para la región Latinoamérica y Caribe, la propuesta plantea comenzar con aproximaciones APV I (Approach Procedure with Vertical Guidance, tipo I), la cual es una categoría de aproximación basada en navegación por satélite que proporciona guía lateral y vertical, pero no cumple con todos los requisitos de precisión, con mínimos entre 250 a 300 ft. Sin embargo, pretende evolucionar a LPV 200, el cual proporciona información precisa sobre la aproximación de una aeronave a una pista con el uso del GNSS. El resultado es una guía vertical lateral y vertical sin necesidad de contacto visual con el suelo hasta que una aeronave está a 200 pies sobre la pista. El procedimiento de aproximación mediante SBAS es denominado SLS.

“El SLS es beneficioso para las aeronaves comerciales de ala fija cuando operan en aeropuertos que no están equipados con guía ILS, y especialmente en condiciones de baja visibilidad y/o con terreno circundante u otros obstáculos. El SLS entró en servicio por primera vez en Europa con el A350 en 2014 y ahora también está disponible en las familias A220, A320, A330 y A380.” (AIRBUS, 2023).

“Dado que el diseño de la función SLS estaba completamente integrado en la arquitectura de la pantalla de la cabina, fue posible hacerlo muy fácil de pilotar. El resultado es que con el SLS, los pilotos no tienen que cambiar la forma en que vuelan la aeronave porque la simbología de guía presentada en la cabina (en la "Pantalla de vuelo principal" - PFD) **se ve igual a la que ya están acostumbrados para una aproximación ILS**. En particular, los chevrones móviles magenta lateral y vertical (debajo y a los lados del indicador de actitud del piloto, respectivamente) son idénticos al equivalente ILS. Además, a lo largo de la parte superior del PFD y durante una aproximación SLS, los pilotos verán las mismas indicaciones de estado de los modos de guía "G/S" ("Pendiente de planeo" vertical) y "LOC"

SLS-APV, al igual que para las aeronaves de ATR. En las *siguientes Ilustraciones 3-12 y 3-13*, se evidencia los modelos de AIRBUS y ATR que cuentan con sistema ILS operativo.



Ilustración 3-12: Aeronaves con sistema SBAS (SLS) de Airbus.

Fuente: Cortesía de Airbus.



Ilustración 3-13: Aeronaves con sistema SBAS(SLS) de ATR.

Fuente: Cortesía de ATR.

Esta información sobre las aeronaves Airbus es crucial para Chile ya que mayoritariamente los vuelos nacionales comerciales operan solamente con aeronaves Airbus, ya que la flota para vuelos de corta distancia en Latam Airlines son de la familia Airbus (Latam Airlines,

s.f.). En el caso de Jet Smart Airlines, en su página web muestran que la flota es de aeronaves A320 y A321 (JetSmart, s.f.) y para Sky Airlines su flota es de A320neo y A321neo (Skyairline, s.f.)

Con toda la información mencionada anteriormente sobre la implementación del sistema SBAS a las aeronaves, se puede corroborar que como este sistema ya se ha incorporado desde hace años en la mayoría de los continentes, las empresas fabricantes de aeronaves han ido evolucionando en conjunto con esta tecnología para aplicarla a sus aeronaves

Conclusiones y recomendaciones.

La implementación de sistemas de aumentación de precisión, como GBAS o SBAS, representaría un avance significativo para la infraestructura y operación de los aeródromos en Chile. Estos sistemas permitirían mejoras en la seguridad, eficiencia y sostenibilidad de las operaciones aeroportuarias, especialmente en condiciones adversas.

El sistema ILS, actualmente utilizado en Chile, presenta limitaciones importantes. Solo 3 aeropuertos de la Red Primaria cuentan con su versión más avanzada (Categoría IIIB), 7 de recintos cuentan con ILS CAT I y los 7 aeródromos restantes no cuentan con este sistema, lo que genera dificultades operativas en condiciones de baja visibilidad. Además, los costos asociados al ILS, tanto de instalación como de mantenimiento, son elevados. Por ejemplo, la implementación de un sistema ILS en el aeródromo Carriel Sur tuvo un costo de 10 millones de dólares.

El GBAS ofrece varias ventajas en comparación con el ILS, como la eliminación de áreas críticas y la capacidad de atender múltiples pistas con una sola instalación dentro de un radio de 23 millas náuticas. También permite un ahorro del 45,6% en costos de mantenimiento anual, lo que hace que se recupere la inversión en solo 5 años. Sin embargo, su implementación en todo el país requeriría múltiples instalaciones, lo que incrementaría los costos iniciales.

Por otro lado, el SBAS se posiciona como la opción más viable a largo plazo. Este sistema tiene la capacidad de cubrir un continente completo, lo que reduce significativamente los costos de implementación al ser compartidos entre los países de la región. Además, genera beneficios económicos directos, como un incremento en la capacidad operativa de los aeropuertos en un 25%, aumenta la exactitud del GPS de 5-10 [m] a 10 [cm] y la seguridad operacional ya que cuenta con guía vertical al igual que el ILS.

Con relación a los costos evidenciados en la Tabla 2, SBAS tiene una mayor inversión, pero con aquel monto cubre todos los aeródromos de la RAN, en cambio por un monto

aproximado el ILS cubriría solo a 21 aeródromos y GBAS probablemente a unos 24. Por lo que SBAS es mejor opción con los datos estudiados.

Tabla 2: Comparativa de costos de implementación y mantenimiento de ILS CAT I, GBAS y SBAS.

	Costos de sistemas de aumentación de precisión		
	ILS CAT I (7)	GBAS	SBAS
Implementación sistema	\$4.355.447.411	\$5.181.785.700	\$10.002.284.827
Mantenimiento anual	\$116.023.915	\$321.061.650	\$1.667.047.471
Total	\$4.471.471.326	\$5.502.847.350	\$11.669.332.298

Fuente: Elaboración propia, con los datos mencionados en el apartado 3.3.

Este sistema, al no requerir infraestructura física en cada pista, permite una cobertura nacional más eficiente y económica, optimizando la operatividad de aeropuertos secundarios y reduciendo cancelaciones, desvíos y tiempos de inactividad. Incluso, no solo le entrega beneficios a la aviación, sino que también aporta precisión en industrias como la agricultura, ferroviaria o marítima.

En conclusión, la implementación del sistema SBAS en Chile permitiría extender los beneficios de la navegación de precisión a todos los aeródromos del país, incluyendo aquellos que actualmente no cuentan con sistemas como el ILS. Al ofrecer guía vertical similar a un ILS Categoría I, el SBAS mejora significativamente la seguridad operacional en las fases de aproximación y aterrizaje, especialmente bajo condiciones meteorológicas desfavorables. Evitando retrasos y cancelaciones, donde como ejemplo ANGA obtiene un ROI de 545% significando que se recupera la inversión y se gana 5,45 veces más.

Por lo tanto, como pasos futuros, se recomienda realizar una evaluación más profunda del retorno de la inversión, tanto desde una perspectiva privada como social, es decir un estudio para verificar en cuantos años se recupera la inversión y cuanto es su beneficio después de recuperada, analizando los beneficios tanto para la aviación como las otras industrias. Posteriormente, realizar una demostración en alguno de los aeródromos de Chile y con

aquello respaldar con evidencia la toma de decisiones, facilitar el financiamiento y avanzar hacia una gobernanza regional colaborativa, inspirada en modelos como EGNOS en Europa.

Finalmente, al tratarse de un sistema con alcance regional, su implementación debiese considerarse en un marco de cooperación continental. Esto permitiría compartir costos, facilitar la inversión y avanzar hacia una aviación más segura, moderna y sostenible para Chile y la región.

Bibliografía

- (2024). Obtenido de Whileint.com: <https://whileint.com/travel/merced/sydney-airport-2023-high-91-recovery/>
- AENA. (2024). Obtenido de <https://www.aena.es/es/prensa/el-aeropuerto-de-malaga-costa-del-sol-cerro-2023-con-mas-de-223---millones-de-pasajeros-y-161.684-vuelos.html>
- Aeroclass. (3 de Enero de 2022). *ILS in Aviation*. Obtenido de Aeroclass.org: <https://www.aeroclass.org/ils-aviation/>
- AERO-NAVES. (2021). Obtenido de Nuevo pudahuel finaliza las obras de construcción del nuevo aeropuerto de santiago: <https://aero-naves.com/2021/07/16/nuevo-pudahuel-finaliza-las-obras-de-construccion-del-nuevo-aeropuerto-de-santiago/>
- Aeropuerto de Sydney. (s.f.). Obtenido de <https://sydneyairportguide.com/es-es/estadisticas/>
- African Union. (2025). *Agenda 2063: The Africa We Want*. Obtenido de Africa Union: <https://au.int/en/agenda2063/overview>
- AIP-CHILE. (16 de MAYO de 2024). *IFIS*. Recuperado el 1 de DICIEMBRE de 2024, de AIP-VOLUMEN 1 GEN 2.5-1: https://aipchile.dgac.gob.cl/dasa/aip_chile_con_contenido/ais/1%20GEN%20Parte%201/GEN%20%20Tablas%20y%20Codigos/iGEN%202.5-1%20GEN%202.5-4%20Radioayudas%20para%20la%20navegacion.pdf
- AIP-Chile Vol 1. (2022). AD 2. AEROPUERTO ARTURO MERINO BENÍTEZ - SANTIAGO. AD 2.9-1 SCEL.
- AIP-CHILE Vol 1. (2023). RADIOAYUDAS, SISTEMAS DE NAVEGACIÓN . ENR 4.1-1 .
- AIRBUS. (01 de junio de 2022). *Satellite-based landing system*. Obtenido de Newsroom: <https://aircraft.airbus.com/en/newsroom/news/2022-06-satellite-based-landing-system>
- AIRBUS. (27 de abril de 2023). *Safety Innovation 8#: Approaching to land safely with 3D precision – thanks to satellite-based systems*. Obtenido de Newsroom: <https://www.airbus.com/en/newsroom/stories/2023-04-safety-innovation-8-approaching-to-land-safely-with-3d-precision-thanks-to>

- al., M. &. (2022). Cooperative D-GNSS Aided with Multi Attribute Decision Making Module: A Rigorous Comparative Analysis. Obtenido de <https://www.mdpi.com/1999-5903/14/7/195>
- Autran, O. (2024). An SBAS for Latam, what for? *Regional LATAM SBAS Virtual Workshop*. Recuperado el 23 de Septiembre de 2024
- Aviación digital*. (2021). Obtenido de ENAIRE, pionera en tecnología satelital GBAS: <https://aviaciondigital.com/enaire-pionera-en-tecnologia-satelital-gbas/>
- Balbo, F. (s.f.). INSTRUMENT LANDING SYSTEM . *IVAO Argentina*.
- Banco del desarrollo de América Latina y el Caribe. (18 de julio de 2024). CAF aprueba financiamiento de USD 500 millones para expandir la red ferroviaria de Chile. Obtenido de <https://www.caf.com/es/actualidad/noticias/caf-aprueba-financiamiento-de-usd-500-millones-para-expandir-la-red-ferroviaria-de-chile/>
- BCN. (20 de 06 de 2020). Obtenido de <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=1146880>
- BioBio Chile. (30 de 11 de 2021). *Detienen a 26 personas que viajaban con exámenes PCR falsificados en un bus hacia Tocopilla*. Obtenido de <https://www.biobiochile.cl/noticias/nacional/region-de-antofagasta/2021/11/30/pcr-falsificados-detienen-a-26-personas-que-viajaban-en-un-bus-en-tocopilla.shtml>
- Cabrera, M. (25 de Julio de 2024). *biobiochile.cl*. Obtenido de <https://www.biobiochile.cl/noticias/nacional/region-de-los-lagos/2024/07/25/los-problemas-que-tienen-a-aeropuerto-el-tepual-de-puerto-montt-con-su-capacidad-reducida.shtml>
- Civil Aviation Authority . (28 de abril de 2023). Risk of Controlled Flight into Terrain during 3D BARO-VNAV and . *SAFETY NOTICE SN-2023/003*. Obtenido de <https://www.caa.co.uk/publication/download/20373>
- Dautermann, & et.al. (Diciembre de 2015). *Science Direct*. Recuperado el 10 de Noviembre de 2024, de Design, implementation and flight testing of advanced RNP to SBAS: <https://pdf.sciencedirectassets.com/271985/1-s2.0-S1270963815X00071/1-s2.0-S1270963815003065/main.pdf?X-Amz-Security-Token=IQoJb3JpZ2luX2VjEF8aCXVzLWVhc3QtMSJHMEUCIGQFXh%2BR4o2>

KdPQFEk6M1S68woF63yeA0Nu7mvr4QG6nAiEA69Zr51ylJa6qoCbvJ%2BEZhk
DYP1SBtR7DB3fH%2Fh

DGAC. (s.f.). *Reglamento tasas y derechos aeronauticos DAR50*. Recuperado el 3 de Diciembre de 2024, de Dirección General de Aeronáutica Civil de Chile: https://www.dgac.gob.cl/wp-content/uploads/2018/10/DAR_50-1.pdf

Diario La región de Coquimbo. (26 de Julio de 2024). Reiteradas cancelaciones y cambios de vuelos en Aeropuerto de La Florida.

Dirección General de Aeronáutica Civil. (Diciembre de 2020). RESOLUCIÓN DE LA DIRECCIÓN GENERAL DE AERONÁUTICA CIVIL (SD.S.L.). *EXENTA N° 11/01194/*, 53. Obtenido de https://www.dgac.gob.cl/lobby/RESOL_11_01194.pdf

Dirección general de aeronáutica civil. (marzo de 2024). OPERACIONES EN CONDICIONES DE ESCASA VISIBILIDAD EN EL AERÓDROMO LA ARAUCANÍA. *DAP 11 132*. Obtenido de https://www.dgac.gob.cl/wp-content/uploads/2025/05/DAP-11_132_ED3_ENM1-30ABR2025.pdf

Dulanto, B. (10 de junio de 2025). Aerolíneas y gremios alertan por deficiencias en infraestructura de aeropuertos regionales que les impide operar con mal tiempo . *Diario Financiero*. Obtenido de <https://www.df.cl/empresas/industria/aerolineas-y-gremios-alertan-por-deficiencias-en-infraestructura-de>

El Calbucano. (10 de 11 de 2020). Obtenido de <https://www.elcalbucano.cl/2020/11/pdi-detiene-a-3-hombres-por-presentar-documentos-pcr-adulterados/>

Equipo DF. (10 de junio de 2025). Autoridad aeronáutica adelanta que aeropuerto de Balmaceda tendrá equipo para operar con mal tiempo en 2026. *Diario Financiero*. Obtenido de <https://www.df.cl/empresas/industria/autoridad-aeronautica-adelanta-que-aeropuerto-de-balmaceda-tendra-equipo>

EUSPA. (s.f.). Obtenido de ¿Qué es SBAS?: <https://www.euspa.europa.eu/eu-space-programme/egnos/what-sbas>

EUSPA. (15 de Mayo de 2025). *EGNOS*. Obtenido de EUSPA: <https://www.euspa.europa.eu/eu-space-programme/egnos>

Federal Aviation Administration (FAA). (2024). (2024). *Aeronautical Information Manual – Chapter 1: Navigation Aids*. Obtenido de FAA: https://www.faa.gov/air_traffic/publications/atpubs/aim_html/chap1_section_2.html

FEDERAL AVIATION ADMINISTRATION. (abril de 2014). SITING CRITERIA FOR INSTRUMENT LANDING SYSTEMS. *ORDER 6750.16E*. Obtenido de https://www.faa.gov/documentLibrary/media/Order/FINAL_SIGNED_Order_6750_16E_ILS_Siting_Criteria_06-09-2014_for_Web_posting%5B1%5D.pdf

Federal Aviation Administration. (27 de Enero de 2022). *faa.gov*. Obtenido de SBAS Benefits: https://www.faa.gov/sites/faa.gov/files/2022-03/SBAS_Worldwide_QFact_2021_final_01272022.pdf

Federal Aviation Administration. (2023). Obtenido de https://www.faa.gov/about/office_org/headquarters_offices/ato/service_units/techops/navservices/gnss/laas/howitworks

Federal aviation administration. (s.f.). GBAS – Frequently Asked Questions.

Fiscalía. (13 de 07 de 2020). Obtenido de http://www.fiscaliadechile.cl/Fiscalia/sala_prensa/noticias_regional_det.do?id=18189

Francisco. (30 de Septiembre de 2024). *Tecnología: Sistema ILS: ¿Qué es y cómo Funciona?* Obtenido de El Bloguero: <https://elbloguero.com/sistema-ils-que-es-y-como-funciona/>

González, Á. J. (2019). Estudio y análisis para la implantación de un sistema GBAS en el Aeropuerto de Gran Canaria. *Universidad de Sevilla*.

Haddad, F. (2023). SBAS SOLUTION FOR CAR SAM REGION. *TWENTY-FIRST MEETING OF THE CARIBBEAN AND SOUTH AMERICAN REGIONS*, (pág. 25). Recuperado el 28 de 11 de 2024, de <https://www.icao.int/NACC/Documents/Meetings/2023/GREPECAS21/GRP21P10.pdf>

Herrera, B. (03 de 09 de 2021). <https://www.df.cl/empresas/actualidad/el-listado-de-las-30-principales-empresas-que-quebraron-o-acudieron-a>. *Diario Financiero*.

IATA. (2021). Cero emisiones netas de CO2 en 2050 .

ICAO. (2013). *GUIA PARA LA IMPLEMENTACION DE SISTEMAS DE AUMENTACIÓN BASADOS EN TIERRA*. Obtenido de <https://www.icao.int/SAM/eDocuments/GuiaGBAS.pdf>

- ICAO. (14 de 09 de 2021). *ICAO*. Obtenido de <https://www.icao.int/APAC/Introduction%20of%20GBAS%20and%20SBAS%20concept/Introduction%20to%20GBAS-SBAS.pdf>
- ICAO. (2023). Risks related to altimeter setting errors during APV Baro-VNAV and non-precision approach operations. Recuperado el 4 de Diciembre de 2024, de https://www.icao.int/EURNAT/EUR%20and%20NAT%20Documents/EUR%20Documents/EUR%20OPS%20BULLETINS/EUR%20OPS%20Bulletin%202023_001.pdf
- INDRA. (s.f.). Obtenido de Reforzamos la sostenibilidad del tráfico aéreo optimizando los aterrizajes: <https://www.indracompany.com/es/reforzamos-sostenibilidad-traffic-aereo-optimizando-aterrizajes>
- INDRA. (Septiembre de 2019). *Indra, socio clave de la alianza que desplegará sistemas de aterrizaje por satélite en los aeropuertos europeos para aumentar su capacidad*. Obtenido de Indra company: <https://www.indracompany.com/es/noticia/indra-socio-clave-alianza-desplegara-sistemas-aterrizaje-satelite-aeropuertos-europeos>
- International Civil Aviation Organization (ICAO). (2008). *Performance-based Navigation (PBN)*. Obtenido de ICAO: https://applications.icao.int/tools/ATMiKIT/story_content/external_files/story_content/external_files/pbn_manual-doc_9613.pdf
- Jeong, & et.al. (2016 de Julio de 2016). *Scopus*. Recuperado el 10 de Noviembre de 2024, de Flight test evaluation of ILS and GBAS performance at Gimpo International Airport: <https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-84928398718&origin=resultslist&sort=plf-f&src=s&sid=9c2baf8ade0d962a664d74145b4b7328&sot=b&sdt=b&s=TITLE-ABS-KEY%28Flight+test+evaluation+of+ILS+and+GBAS+performance+at+Gimpo+International+Airport%29&sl>
- JetSmart. (s.f.). *Quiénes somos*. Obtenido de Jetsmart: <https://jetsmart.com/cl/es/quienes-somos>

- Kovar, & et.al. (2023). *SBAS-based navigation system for precision approach*. Recuperado el 10 de Noviembre de 2024, de Web of Science: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/2526/1/012060/pdf>
- Krasuski, & et.al. (Abril de 2020). *Web of Science*. Obtenido de Monitoring Aircraft Position Using EGNOS Data for the SBAS APV Approach to the Landing Procedure: <https://www.webofscience.com/wos/woscc/full-record/WOS:000537110500141>
- La Araucanía. (17 de 06 de 2020). Condenan a 244 días de presidio a sujeto que incumplió cuarentena y toque de queda.
- La opinión. (2014). *La opinión de Malaga*. Obtenido de <https://www.laopiniondemalaga.es/malaga/2014/05/06/malaga-primer-aeropuerto-pais-sistema-28633898.html>
- La Tercera citando a Galdames. (04 de 05 de 2020). *Sujeto que incumplió cuarentena dos veces en un día e infringió toque de queda en Puente Alto termina en prisión preventiva*.
- La Vanguardia*. (2019). Obtenido de Indra, socio de la alianza europea GBAS para el despliegue sistemas de aterrizaje por satélite: <https://www.lavanguardia.com/vida/20190913/47320986190/indra-socio-de-la-alianza-europea-gbas-para-el-despliegue-sistemas-de-aterrizaje-por-satelite.html>
- Latam Airlines. (s.f.). *Nuestra flota*. Obtenido de Latam Airlines: <https://www.latamairlines.com/cl/es/sobre-latam/flota?msocid=08cc0f79142c6acf18061a8a15896b91>
- Macías, R. P. (s.f.). *GBAS: MÁS QUE UN “NUEVO” SISTEMA DE APROXIMACIÓN DE PRECISIÓN*. Obtenido de Hispaviación: GBAS: MÁS QUE UN “NUEVO” SISTEMA DE APROXIMACIÓN DE PRECISIÓN - Hispaviación
- Medina, A. (2011). *Aproximación ILS y Frustrada*. Obtenido de Dpto. Formación IVAO-ES : <https://files.es.iviao.aero/formacion/documentos/SPP/AproximacionILSyFrustradas.pdf>
- Mercado Público. (Julio de 2013). <https://www.mercadopublico.cl/Procurement/Modules/RFB/DetailsAcquisition.aspx?qs=uAz4OSU7FKDII+Hd3iEa8Q%3D%3D>. Obtenido de www.mercadopublico.cl:

<https://www.mercadopublico.cl/Procurement/Modules/RFB/DetailsAcquisition.aspx?qs=uAz4OSU7FKDII+Hd3iEa8Q%3D%3D>

Mercado Público. (Abril de 2018). <https://www.mercadopublico.cl/Procurement/Modules/RFB/DetailsAcquisition.aspx?qs=gcUub4UvNK5WYkxpDqrwcg==>. Obtenido de www.mercadopublico.cl/Procurement/Modules/RFB/DetailsAcquisition.aspx?qs=gcUub4UvNK5WYkxpDqrwcg==

Ministerio de Obras Públicas. (2025). MOP proyecta triplicar capacidad del Aeropuerto de Santiago para recibir a 84 millones de pasajeros al año. Obtenido de <https://www.mop.gob.cl/mop-proyecta-triplicar-capacidad-del-aeropuerto-de-santiago-para-recibir-a-84-millones-de-pasajeros-al-ano/>

Ministerio de Obras Públicas. (Enero de 2025). *Red Aeroportuaria Nacional*. Obtenido de Dirección de Aeropuertos: <https://aeropuertos.mop.gob.cl/red-aeroportuaria-nacional/>

Ministerio de Obras Públicas, Dirección de Aeropuertos. (Febrero de 2025). *Red Primaria: La columna vertebral*. Obtenido de Ministerio de Obras Públicas: <https://aeropuertos.mop.gob.cl/red-primaria-2/>

Ministerio de Obras Públicas, Dirección de Aeropuertos. (Febrero de 2025). *Red Secundaria*. Obtenido de Ministerio de Obras Públicas: <https://aeropuertos.mop.gob.cl/red-secundaria-2/>

Ministerio de Salud. (13 de 03 de 2020). Obtenido de https://www.minsal.cl/wp-content/uploads/2020/03/2020.03.13_INDICACIONES-EN-CUARENTENA.pdf

Ministerios de Obras Públicas. (Enero de 2025). *Dirección de Aeropuertos*. Obtenido de Red Pequeños Aeródromos: <https://aeropuertos.mop.gob.cl/red-pequenos-aerodromos/>

MOP. (2018). DÍPTICO AEROPUERTO INTERNACIONAL ARTURO MERINO BENITEZ DE SANTIAGO.

Navipedia. (s.f.). *EGNOS Ground Segment*. Obtenido de Navipedia: https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/EGNOS_Ground_Segment#CCF

Nuevo Pudahuel. (2022). Obtenido de Habemus nuevo Terminal Internacional: El 26 de febrero de 2022 se inauguró el T2: <https://nuevopudahuel.cl/noticia/inauguracion-terminal-internacional#:~:text=Noticia->

,Habemus%20nuevo%20Terminal%20Internacional%3A%20El%2026%20de%20febrero%20de%202022,el%20m%C3%A1s%20modernos%20de%20Sudam%C3%A9rica.

OACI. (27 de julio de 2023). Risks related to altimeter setting errors during APV Baro-VNAV and non-precision approach operations . *Bulletin 2023_001*. Obtenido de https://www.icao.int/EURNAT/EUR%20and%20NAT%20Documents/EUR%20Documents/EUR%20OPS%20BULLETINS/EUR%20OPS%20Bulletin%202023_001.pdf

OACI citando a Thales. (2016). RESULTADOS DEL SEMINARIO/TALLER DE INFRAESTRUCTURA DE NAVEGACIÓN DE SOPORTE A LA PBN. Lima: OACI.

Oliveira, P., Silva, J., & Soares, P. (2020). A Comparative Study between ILS and GBAS Approaches: The Case of Viseu Airfield.

Piquero, F. (2015). *Hispaviación*. Obtenido de <https://www.hispaviacion.es/sistema-instrumental-de-aterizaje-el-ils/>

Prensa. (3 de junio de 2024). *¿Cuánto combustible gasta un avión comercial?* Obtenido de IASCA: <https://iasca.aero/cuanto-combustible-gasta-un-avion-comercial/>

Red Comunes. (10 de enero de 2025). Aeropuerto La Florida peligran expansión de pista de aterrizaje por Bypass. *El Serenense*. Obtenido de https://www.elsenense.cl/comunes/2025/01/07/aeropuerto-la-florida-peligra-expansion-de-pista-de-aterizaje-por-bypass/#google_vignette

Seremi MOP Aysén. (28 de Agosto de 2024). Anuncian obras para instalación de Sistemas de Aterrizaje Instrumental en Aeródromo de Balmaceda. Recuperado el 2 de Diciembre de 2024, de Anuncian obras para instalación de Sistemas de Aterrizaje Instrumental en Aeródromo de Balmaceda: <https://aysen.mop.gob.cl/anuncian-obras-para-instalacion-de-sistemas-de-aterizaje-instrumental-en-aerodromo-de-balmaceda/>

Seremi Región de Ñuble. (15 de 06 de 2020). Obtenido de <https://www.seremidesaludnuble.cl/autoridad-sanitaria-ha-aplicado-multas-por-110-millones-por-infracciones-en-contexto-de-pandemia/>

- Skyairline. (s.f.). *SKY es reconocida como la flota más nueva de Sudamérica por tercer año consecutivo*. Obtenido de Skyairline: <https://www.skyairline.com/blog/sky-es-reconocida-como-la-flota-mas-nueva-de-sudamerica-por-tercer-ano-consecutivo/>
- SKYbrary Aviation Safety. (s.f.). *Required Navigation Performance (RNP)*. Obtenido de SKYbrary: <https://skybrary.aero/articles/required-navigation-performance-rnp>
- TallyHo. (9 de Marzo de 2018). Inaugurado sistema ILS para el Aeródromo Carriel Sur. *Revista aeronáutica chilena*. Recuperado el 3 de Diciembre de 2024
- Thales Alenia Space. (14-17 de Noviembre de 2023). *GREPECAS-21*. Recuperado el 4 de Diciembre de 2024, de Organización de aviación civil internacional: <https://www.icao.int/NACC/Documents/Meetings/2023/GREPECAS21/GRP21NE24Rev.pdf>
- Thales Alenia Space. (2 de Febrero de 2023). *Thales Alenia Space*. Obtenido de Comunicados de prensa: <https://www.thalesaleniaspace.com/en/press-releases/anga-programme-and-nigcomsat-ltd-conjunction-nigerian-airspace-management-agency-and>
- Thales Alenia Space. (29 de Enero de 2024). *Thales Alenia Space*. Obtenido de Comunicados de prensa: <https://www.thalesaleniaspace.com/en/press-releases/koreas-kassatellite-navigation-system-certified-national-authorities-and-enters>
- TRADING ECONOMICS. (s.f.). *PIB DE CHILE DEL SECTOR AGRÍCOLA*. Obtenido de TRADING ECONOMICS: <https://es.tradingeconomics.com/chile/gdp-from-agriculture>
- Universidad de Valparaíso. (09 de 05 de 2021). Obtenido de <https://rvl.uv.cl/noticias/4680-los-argumentos-de-la-corte-de-apelaciones-de-valparaiso-para-no-considerar-delito-falsificar-un-permiso>
- Varela, L. (06 de Junio de 2025). Solo 2 mangas: consideran que modernización del aeródromo La Florida es obra tardía e insuficiente. *elDía*. Obtenido de <https://www.diarioeldia.cl/noticias/2025/06/06/127043-solo-2-mangas-consideran-que-modernizacion-del-aerodromo-la-florida-es-obra-tardia-e-insuficiente>