

UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE AERONÁUTICA
SANTIAGO – CHILE



**DETERMINAR LA CAPACIDAD OPERACIONAL DE UN
AEROPUERTO MEDIANTE SOFTWARE DE SIMULACIÓN
SIMMOD PRO.
CASO APLICADO A AEROPUERTO INTERNACIONAL
ARTURO MERINO BENÍTEZ (SCEL-SCL)**

JOAQUÍN IGNACIO QUIROGA MORAGA

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO EN AVIACION COMERCIAL

PROFESOR GUÍA : Sr. Martinus Potters
PROFESOR 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: DETERMINAR LA CAPACIDAD OPERACIONAL DE UN AEROPUERTO MEDIANTE SOFTWARE DE SIMULACIÓN SIMMOD PRO. CASO APLICADO A AEROPUERTO INTERNACIONAL ARTURO MERINO BENÍTEZ (SCEL-SCL)

Nombre del candidato(a): JOAQUÍN IGNACIO QUIROGA MORAGA

Carrera / Grado: INGENIERIA EN AVIACION COMERCIAL

Campus: Santiago Vitacura ; **Departamento:** DEPARTAMENTO DE AERONAUTICA

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, MARTINUS POTTERS, 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):

4.- FIRMAS

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

Fecha: 28/07/2025 ; Firma: _____

Estudiante o Candidato(a): Joaquin Ignacio Quiroga Moraga

Fecha: 28/07/2025 ; 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.

Resumen ejecutivo

Esta memoria ahonda en el uso del software de simulación Simmod Pro! como herramienta para determinar la capacidad operacional del aeropuerto Internacional Arturo Merino Benítez en la actualidad, además de analizar y proponer mejoras viables, de acuerdo con la normativa nacional e internacional, que tienen como objetivo aumentar la capacidad operacional manteniendo la infraestructura existente.

En la actualidad, la Dirección General de Aeronáutica Civil (DGAC) cuenta con una capacidad operacional declarada para cada aeropuerto en Chile en función de la capacidad de control ATC con la que cuenta cada uno de los aeropuertos o aeródromos. En el caso de SCEL, esta capacidad es de 53 operaciones por hora al considerar ambas pistas en funcionamiento, capacidad que, de acuerdo con las proyecciones de demanda presentes en la actualización del plan maestro, estaría llegando a su saturación aproximadamente el año 2030 cuando la demanda alcance las 51 operaciones por hora.

Mediante el uso de Simmod Pro! se logró determinar que la capacidad operacional de SCEL es de 65 operaciones por hora, 12 operaciones más que las declaradas por DGAC, considerando la estructura del flujo, separaciones horizontales y configuraciones de pista que se utiliza en la actualidad en SCEL.

Al implementar una disminución en las separaciones horizontales entre aproximaciones y despegues continuos, de acuerdo con la normativa internacional, se observa un aumento del 38% en la capacidad operacional con respecto al escenario principal, alcanzando un total de 90 operaciones por hora considerando un uso mixto e independiente de las pistas de SCEL, lo que equivale a un aumento del 70% en la capacidad operacional con respecto a la declarada en la actualidad por DGAC.

Estos resultados se asemejan a las capacidades declaradas en la última actualización del plan maestro a la fecha de publicación (SCL1-20-GE-GN-IN-001 - INFORME FINAL PLAN MAESTRO AMB, 2021) permitiendo así, aportar a la confiabilidad que estos softwares tienen para poder ser utilizados como referencia por parte de la autoridad.

Los resultados presentados en esta memoria permitirían postergar en hasta 9 años la fecha de saturación del principal aeropuerto de Chile manteniendo los retrasos promedio por debajo de los 10 minutos.



Conceptos clave:

Capacidad operacional, Simulación aeroportuaria, Simmod Pro!, Aeropuerto Arturo Merino Benítez, Separación horizontal entre aeronaves, Uso independiente de pistas, Análisis operacional, Demanda aeroportuaria.

Abstract

This thesis explores the use of the Simmod Pro! simulation software as a tool to determine the current operational capacity of Arturo Merino Benítez International Airport, as well as to analyze and propose viable improvements, in accordance with national and international regulations, aimed at increasing operational capacity while maintaining the existing infrastructure.

Currently, the DGAC (Dirección General de Aeronáutica Civil) declares the operational capacity for each airport in Chile based on the ATC control capacity available at each airport or aerodrome. In the case of SCEL, this capacity is 53 operations per hour, considering both runways in use. According to demand projections presented in the updated master plan, this capacity is expected to reach saturation around the year 2030 when demand reaches 51 operations per hour.

By using Simmod Pro!, it was determined that the actual operational capacity of SCEL is 65 operations per hour, which is 12 more operations than those declared by DGAC, considering current flow structures, horizontal separations, and runway configurations used at SCEL.

By implementing a reduction in horizontal separations between continuous approaches and continuous departures, in line with international regulations, a 38% increase in operational capacity was observed compared to the baseline scenario, reaching a total of 90 operations per hour, considering a mixed and independent use of SCEL's runways. This represents a 70% increase compared to the currently declared capacity by DGAC.

These results are consistent with the capacities declared in the most recent update of the master plan at the time of publication (SCL1-20-GE-GN-IN-001 - INFORME FINAL PLAN MAESTRO AMB, 2021) thereby supporting the reliability of such simulation tools to be used as a reference by the authorities.

The results presented in this thesis would allow postponing the saturation date of Chile's main airport by up to 9 years, while keeping average delays below 10 minutes.

Keywords: Operational capacity, Airport simulation, Simmod Pro!, Arturo Merino Benítez Airport, horizontal separation between aircraft, independent runway use, Operational analysis, Airport demand.



Tabla de contenido

Resumen ejecutivo.....	2
Abstract.....	4
Listado de abreviaciones	14
Introducción:.....	15
1. Capítulo 1: Antecedentes del tema:.....	17
1.1. Justificación del tema	17
1.2. Objetivos.....	20
1.1.1. Objetivo general:	20
1.2.1. Objetivos secundarios:.....	20
1.3. Metodología.....	21
1.3.1. Recopilación normativa nacional e internacional.....	21
1.3.2. Levantamiento de variables claves para la modelación, SCEL.....	21
1.3.3. Modelación y simulación de SCEL en Simmod Pro!.....	22
1.4. Alcance	23
2. Capítulo 2: Estado del arte	24
2.1. Antecedentes.....	24
2.2. Marco teórico.....	27
2.2.1. Normativa regulatoria nacional e internacional.....	27
2.2.2. Métodos para la determinación de la capacidad operacional.	34
2.2.3. Situación actual de la capacidad operacional en SCEL.....	44
2.2.4. Estudios previos con softwares de simulación.	46
2.3. Propuesta metodológica.....	51
2.3.1. Recopilación de información aeronáutica oficial.	51
2.3.2. Análisis cumplimiento normativo nacional e internacional.	51



2.3.3.	Recopilación de variables operacionales.....	52
2.3.4.	Modelamiento de SCEL en Simmod Pro!.....	53
2.3.5.	Análisis y presentación de los resultados.....	53
3.	Capítulo 3: Desarrollo.....	55
3.1.	Recopilación de información aeronáutica oficial.....	55
3.2.	Análisis cumplimiento normativa nacional e internacional.....	60
3.2.1.	Normativa infraestructura terrestre.....	60
3.2.2.	Normativa espacio aéreo y modos de operación.....	63
3.3.	Recopilaciones variables operacionales.....	72
3.3.1.	Recopilación de información desde BBDD.....	72
3.3.2.	Cálculo de variables mediante herramienta Skywise.....	85
3.4.	Modelamiento de SCEL en Simmod Pro!.....	97
3.4.1.	Parámetros lado aire del aeropuerto.....	99
3.4.2.	Parámetros espacio aéreo.....	107
3.4.3.	Otras variables.....	115
3.5.	Análisis y presentación de los resultados.....	120
3.5.1.	Resultados escenario actual.....	121
3.5.2.	Resultados escenario optimizado.....	125
3.5.3.	Comparación con plan maestro.....	132
	Conclusiones.....	134
4.	Bibliografía.....	136
	Anexo 1: Reportes y resultados de las simulaciones.....	141



Índice Gráficos:

Gráfico 1.1 Cantidad de pasajeros transportados por año en SCEL y su variación anual...	17
Gráfico 1.2 Cantidad de operaciones realizadas por año en SCEL con su variación anual.	18
Gráfico 3.1 Porcentaje de operaciones realizadas por pista de SCEL, periodo 2022-2023.	73
Gráfico 3.2 Distribución de las operaciones por pista de SCEL.	73
Gráfico 3.3 Horas con más operaciones realizadas durante 2024 en SCEL.....	74
Gráfico 3.4 Tiempos de ocupación de pista promedio por TWY y tipo de aeronave.....	93
Gráfico 3.5 Distribución de los tiempos de aproximación desde las 5 y 3 [NM], aeronave CAT Medium.	94
Gráfico 3.6 Distribución de los tiempos de despegue y sobrevuelo hasta 2 [NM] del umbral de RWY 35L.	95
Gráfico 3.7 Cantidad de operación y atraso promedio para operaciones segregadas, escenario actual.....	121
Gráfico 3.8 Cantidad de operación y atraso promedio para operaciones mixtas hora punta, escenario actual.....	123
Gráfico 3.9 Cantidad de operación y atraso promedio para operaciones segregadas, escenario optimizado.	127
Gráfico 3.10 Cantidad de operación y atraso promedio para operaciones mixtas hora punta, escenario optimizado.	129
Gráfico 3.11 Cantidad de operación y atraso promedio para operaciones mixtas, escenario optimizado.	130



Índice Tablas:

Tabla 2.1 Clasificación de aeronaves, Advisory Circular N° 150/5060-5, FAA.	34
Tabla 2.2 Capacidad operacional actual para algunos de los principales aeropuertos en EE. UU.	47
Tabla 2.3 Resultados presentados de la simulación del aeropuerto KOAK.	48
Tabla 3.1 Distancias declaradas para las RWY de SCEL.	56
Tabla 3.2 Cantidad de METAR analizados y % bajo mínimos (5 [Km] y 1500' [Ft]) SCEL.	64
Tabla 3.3 Cantidad de METAR analizados y % bajo mínimos (5 [Km] y 5000' [Ft]) SCEL.	65
Tabla 3.4 Cantidad de operaciones comerciales y de carga realizadas por año en SCEL.	72
Tabla 3.5 Criterios para la categorización de aeronaves según OACI.	74
Tabla 3.6 Porcentaje de operaciones realizadas por categoría de aeronaves OACI.	75
Tabla 3.7. Aeropuertos con más operaciones desde o hacia SCEL durante 2024.	75
Tabla 3.8 Porcentajes de vuelos en base a ubicación geográfica de Origen/Destino.	76
Tabla 3.9 Porcentaje de uso para cada SID utilizada en vuelos hacia el NORTE.	77
Tabla 3.10 Porcentaje de uso para cada SID utilizada en vuelos hacia el SUR.	77
Tabla 3.11 Porcentaje de uso para cada STAR utilizada en vuelos desde el SUR.	78
Tabla 3.12 Porcentaje de uso para cada SID utilizada en vuelos hacia el ESTE.	78
Tabla 3.13 Cantidad y porcentaje de uso por SID durante 2024.	80
Tabla 3.14 Cantidad y porcentaje de uso por STAR durante 2024.	83
Tabla 3.15 Cantidad y porcentaje de uso por STAR durante 2024 considerando redistribución del flujo.	83
Tabla 3.16 Porcentaje de vuelos realizados por cada STAR/SID a modelar en Simmod Pro!.	84
Tabla 3.17 STAR a modelar en Simmod Pro!	85
Tabla 3.18 IAC que serán modeladas en Simmod Pro!.	85
Tabla 3.19 Velocidades promedio de aeronaves CAT Medium para todos los waypoint analizados STAR.	88
Tabla 3.20 Velocidades promedio de aeronaves CAT Heavy para todos los waypoint analizados STAR.	89



Tabla 3.21 Velocidades promedio para aeronaves CAT Medium en waypoints analizados IAC. 89

Tabla 3.22 Velocidades promedio para aeronaves CAT Heavy en waypoints analizados IAC. 89

Tabla 3.23 Velocidades promedio aeronaves CAT Medium para todos los waypoints analizados SID..... 90

Tabla 3.24 Velocidades promedio aeronaves CAT Heavy para todos los waypoints analizados SID..... 90

Tabla 3.25 Porcentaje de uso para cada TWY de salida de RWY 17L, aeronave CAT Medium. 93

Tabla 3.26 Velocidades promedio de ingreso y salida de cada TWY evaluada, aeronave CAT Medium..... 94

Tabla 3.27 Tiempos de aproximación a RWY 17L desde 5 y 3 [NM] aeronave CAT Medium. 94

Tabla 3.28 Tiempos ocupación de pista en despegue y desde despegue hasta 2 [NM], aeronave CAT Medium..... 95

Tabla 3.29 Tiempos de aproximación a RWY 17L desde 5 y 3 [NM] aeronave CAT Heavy. 95

Tabla 3.30 Tiempos ocupación de pista y velocidades de ingreso a TWY, aeronaves CAT Heavy..... 96

Tabla 3.31 Tiempos ocupación de pista en despegue y desde despegue hasta 2 [NM], aeronave CAT Heavy. 96

Tabla 3.32 Velocidades definidas para cada sección definida en el análisis. 110

Tabla 3.33 Separación por estela turbulenta entre categorías..... 112

Tabla 3.34 Resultados obtenidos al considerar operaciones segregadas en el escenario actual. 122

Tabla 3.35 Distribución del flujo modelado en base a las horas punta durante 2024, SCLE. 123

Tabla 3.36 Resultados obtenidos considerando uso mixto, escenario actual. 124

Tabla 3.37 Separaciones por estela turbulenta entre categorías de aeronaves. Escenario optimizado. 125



Tabla 3.38 Distribución de los vuelos simulados para escenario optimizado de SCEL.....	127
Tabla 3.39 Resultados obtenidos considerando operaciones segregadas, escenario optimizado.	128
Tabla 3.40 Resultados obtenidos considerando uso mixto hora punta, escenario optimizado.	129
Tabla 3.41 Resultados obtenidos considerando uso mixto independiente, escenario optimizado.	131
Tabla 3.42 Proyección de la demanda de operaciones por hora, aeropuerto SCEL.	132
Tabla 3.43 Cumplimiento de la demanda proyectada para cada escenario analizado.	132

Índice Imágenes:

Imagen 2.1 De (Figure 3-3. Rapid exit taxiway, 2022, pág. 78)	28
Imagen 2.2 Carta de salida normalizada por instrumentos SID para el aeropuerto SCEL... 29	
Imagen 2.3 Carta de llegada normalizada STAR que ordena flujo del norte y este para aeropuerto SCEL.	30
Imagen 2.4 Carta de aproximación (IAC) RNP (AR) autorizada para APP simultaneas SCEL.	31
Imagen 2.5 De (Figure 2-3. NOZ and NTZ example for one runway centre line spacing, 2020, pág. 27)	32
Imagen 2.6 De (Figure 3-1. Independent instrument departures when parallel runway spacing is less than 1 525 m (5 000 ft) but no less than 760 m (2 500 ft), 2020, pág. 42)	32
Imagen 2.7 De (Figure 3-1. Independent instrument departures when parallel runway spacing is less than 1 525 m (5 000 ft) but no less than 760 m (2 500 ft), 2020, pág. 42)	33
Imagen 2.8 Capacidad por hora y año para un aeropuerto tipo SCEL.	35
Imagen 2.9 Capacidad por hora de un aeropuerto tipo SCEL bajo condiciones IFR.	36
Imagen 2.10 Tabla de evaluación de los softwares en base a criterios definidos por el autor.	42
Imagen 2.11 Capacidad declarada de las pistas de SCEL.	44
Imagen 2.12 (Figure 8: Proposed Runway 29 Access Improvement at Oakland International Airport, 2006, pág. 18)	48
Imagen 2.13 (Figure 9: Proposed High-Speed Runway Exit at Oakland International Airport, 2006, pág. 19)	48
Imagen 2.14 (Figure 4. The simulation model of Istanbul New Airport Phase 1-a in SIMMOD., 2019, pág. 439)	49
Imagen 2.15 (Fig 2. Modeling Incheon international airport, 2019, pág. 22)	50
Imagen 3.1 (AIP-Chile VOL II AMDT N° 99, 2025, pág. 696)	56
Imagen 3.2 Adaptado de: (SCEL - STAR 11 RNAV RWY 17R SUKSA 2A, 2025, pág. 681)	57
Imagen 3.3 Tabla complementaria a cartilla STAR 11, SCEL.	58
Imagen 3.4 Ubicación de las intersecciones obtenidas con la herramienta QGIS.	58
Imagen 3.5 Tabla con las coordenadas obtenidas gracias a QGIS.	59



Imagen 3.6 Distancia ente RWY 17L y RWY 17R obtenida mediante el uso de herramienta QGIS..... 61

Imagen 3.7 Angulo de intersección entre TWY C y RWY 17L. 62

Imagen 3.8 longitud del radio de curva de viraje para TWY C..... 62

Imagen 3.9 Requisitos de visibilidad para poder operar aproximaciones simultaneas SCEL. 64

Imagen 3.10 (Figure 2-3. NOZ and NTZ example for one runway centre line spacing, 2020, pág. 27) 67

Imagen 3.11 Distancias obtenidas entre las trayectorias de aproximación SCEL..... 67

Imagen 3.12 Frustrada divergente en 30° para RWY 17L respecto a salidas por RWY 17R. 68

Imagen 3.13 (Figure 3-1. Independent instrument departures when parallel runway spacing is less than 1 525 m (5 000 ft) but no less than 760 m (2 500 ft), 2020, pág. 42) 70

Imagen 3.14 Divergencia entre las trayectorias de posibles despegues simultáneos, SCEL. 71

Imagen 3.15 STAR EROLO 2D y EROLO 8A conectando con aproximación a SCEL. 82

Imagen 3.16 Ejemplo de vértices y zonas definidas para la evaluación de velocidades en aproximación. 86

Imagen 3.17 Ejemplo de las condiciones utilizadas para definir las zonas de evaluación... 87

Imagen 3.18 Velocidad IAS al momento de ingresar a la zona evaluada..... 87

Imagen 3.19 Puntos de marcaje evaluados, vuelos extraídos de **Flight Radar**..... 88

Imagen 3.20 Zonas evaluadas en aproximación a RWY 17L, SCEL..... 91

Imagen 3.21 Zonas evaluadas TWYs RWY 17L, SCEL..... 92

Imagen 3.22 Lógicas utilizadas para unir las zonas evaluadas, ejemplo de la zona a 5 [NM] del umbral. 92

Imagen 3.23 Flujo creado con el fin de obtener los tiempos de aproximación y ocupación de pista..... 93

Imagen 3.24 Parámetros que deben tener información para poder realizar una simulación.97

Imagen 3.25 Distribución de todas las secciones disponibles en Simmod Pro!..... 98

Imagen 3.26 Lista de todas las secciones de parámetros disponibles. 99

Imagen 3.27 Ejemplo de la creación de un punto terrestre, TWY.23. 100

Imagen 3.28 Ejemplo de la creación de un link terrestre, G43-TO-G44.....	101
Imagen 3.29 Ejemplo de la creación de una puerta de embarque, A12.....	102
Imagen 3.30 Creación de una pista de aterrizaje, caso ejemplo RWY 17L.....	103
Imagen 3.31 Creación de zonas de espera, zona de espera RWY 17L de referencia	105
Imagen 3.32 Herramienta utilizada para crear grupos de aeronaves en tierra, ejemplo Large en SCEL.....	106
Imagen 3.33 representación de todos los parámetros terrestres modelados, aeropuerto SCEL.	106
Imagen 3.34 Sección donde se modelan los waypoints, waypoint DONTI utilizado de ejemplo.	108
Imagen 3.35 Sección donde se modelan los links aéreos, caso de ejemplo link ELO69-TO-NEGAG.	109
Imagen 3.36 Sección donde se crean las rutas dentro de Simmod. SID10 desde RWY17R utilizada de ejemplo.....	110
Imagen 3.37 Herramienta utilizada para la creación de grupos aéreos. Grupo MEDIUM presentado de ejemplo.	112
Imagen 3.38 Herramienta utilizada para crear puntos de transición. Punto RWY17L presentado como ejemplo.	113
Imagen 3.39 Herramienta utilizada para crear procedimientos. Proc DEP_17LA utilizado de ejemplo.	115
Imagen 3.40 Flujo de cada análisis realizado y presentado.....	120



Listado de abreviaciones

- AIP:** Aeronautical Information Publication / Publicación de Información Aeronáutica.
- ATC:** Control de Tránsito Aéreo.
- ATFM:** Air Traffic Flow Management / Gestión de Flujo de Tránsito Aéreo.
- DAN:** Norma Aeronáutica.
- DGAC:** Dirección General de Aeronáutica Civil de Chile.
- FAA:** Federal Aviation Administration / Administración Federal de Aviación.
- IAC:** Instrument approach charts / Cartas de aproximación.
- IATA:** International Air Transport Association / Asociación Internacional de Transporte Aéreo.
- IFR:** Instrument Flight Rules / Reglas de Vuelo por Instrumentos.
- ILS:** Instrument Landing System / Sistema de aterrizaje instrumental.
- METAR:** Météorologique Aviation Régulière / Informe meteorológico aeronáutico de rutina.
- MOP:** Ministerio de Obras Públicas.
- MTOW:** Maximum Take-Off Weight / Peso máximo de despegue.
- OACI:** Organización de Aviación Civil Internacional.
- RWY:** Runway / Pista.
- SAM:** OACI South American Region.
- SCEL:** Código OACI del Aeropuerto Internacional Arturo Merino Benítez.
- SCL:** Código IATA del Aeropuerto Internacional Arturo Merino Benítez.
- SID:** Standard Instrument Departure / Salida Normalizada por Instrumentos.
- STAR:** Standard Terminal Arrival Route / Llegada Normalizada por Instrumentos.
- TMA:** Área de Control Terminal.
- TWY:** Taxiway / Calle de rodaje.
- VFR:** Visual Flight Rules / Reglas de Vuelo Visual.

Introducción:

El pasado 29 de diciembre del año 2024 el Aeropuerto Internacional Arturo Merino Benítez (SCEL/SCL) registro un hito histórico en sus más de 57 años de historia: alcanzó los 26 millones de pasajeros transportados en un año.

Esta cifra récord aumentaría a 26.064.563 de pasajeros al finalizar el año, lo que representa un aumento del 12,7% en comparación al año 2023 y un aumento del 5% en comparación a los casi 25 millones de pasajeros que se transportaron durante el año 2019, previo a la pandemia de Covid-19 que redujo la cantidad de pasajeros transportados en un 65% durante el 2020 (BD_Trafico_aereo-2014-2025 [Base de datos], 2025).

Este aumento en la cantidad de pasajeros transportados por SCEL fue posible gracias, a las también históricas, 178.872 operaciones (Aterrizajes/Despegues) realizadas durante el 2024, de las cuales, 164.258 (91,8%) fueron operaciones de carácter comercial y 6.339 (3,5%) relacionadas al mundo de la carga (Panel Interactivo – Operaciones de Aeronaves, 2025).

El crecimiento sostenido en la cantidad de pasajeros transportados y la cantidad de operaciones realizadas anualmente, van de la mano con el crecimiento proyectado en la última actualización disponible del plan maestro actual de SCEL. En el caso de los terminales de pasajeros, la infraestructura actual de dichos terminales tiene una capacidad máxima de 30 millones de pasajeros, que según proyecciones de demanda publicadas por el Ministerio de Obras Públicas (MOP) sería alcanzada este año 2025, aumentando a 57,6 millones de pasajeros para el año 2040¹.

En cuanto a la capacidad operacional del aeropuerto SCEL, la cantidad máxima de operaciones por hora declarada actualmente por la DGAC es de 29 Ops/hr para RWY 17L y RWY17R por separado, y de 53 Ops/hr para ambas pistas operando de manera simultánea². Dentro de las proyecciones publicadas por el MOP³, se estima que para el año 2030 la demanda de operaciones aéreas será de 51 Ops/hr, aumentando a 85 Ops/hr en el año 2039 para alcanzar, en el año 2045, una demanda de 112 Ops/hr, muy por encima de la capacidad máxima declarada en la actualidad.

¹ Cifras presentadas en la actualización del plan maestro (SCL1-20-GE-GN-IN-001 - INFORME FINAL PLAN MAESTRO AMB, 2021, pág. 61)

² (ENR 1.9: Organización de la gestión de afluencia del tránsito aéreo (ATFM), 2023)

³ Proyecciones de demanda plan maestro (SCL1-20-GE-GN-IN-001 - INFORME FINAL PLAN MAESTRO AMB, 2021, pág. 63)

Estas proyecciones presentadas por el MOP implican un desafío importante en cuanto al desarrollo de nueva infraestructura de terminal de pasajeros y a la optimización y reestructuración del espacio aéreo y lado aire del aeropuerto SCEL, con el fin de poder solventar la demanda proyectada para los próximos 20 años en materia de pasajeros transportados y cantidad de operaciones realizadas durante las horas de mayor demanda.

Es debido a todos estos desafíos que se avecinan, para el aeropuerto más importante de Chile, que se decide abarcar y desarrollar, en esta memoria, el cálculo y determinación de la capacidad operacional máxima que tiene SCEL con la infraestructura actual, además de analizar distintos ajustes que se le pueden realizar a las variables clave con el objetivo de determinar si existen mejoras en la capacidad operacional sin la necesidad de ampliar la infraestructura existente del lado aire del aeropuerto.

Mediante el uso del software Simmod Pro se busca modelar el escenario actual del aeropuerto SCEL gracias a la recopilación de toda la información y normativa vigente publicada por la DGAC además del uso de data histórica sobre distintos parámetros fundamentales para el cálculo de la capacidad operacional como lo son, tipo de aeronaves que operan en SCEL, configuración y uso de las pistas de aterrizaje, ubicación y diseño de las calles de rodaje, velocidades en aproximación, entre otros.

Todos estos objetivos y su respectivo desarrollo tienen como finalidad poder entregar resultados admisibles sobre la capacidad operacional de SCEL gracias a la vasta información reglamentaria y operacional que se utiliza como inputs para el desarrollo de la simulación con el objetivo de poder determinar la capacidad operacional gracias a la optimización de flujos durante las fases de despegue y aproximación a SCEL.

1. Capítulo 1: Antecedentes del tema:

1.1. Justificación del tema

Durante el año 2024, un total de 28.169.121 pasajeros aterrizaron o despegaron de algún aeropuerto o aeródromo en Chile, de los cuales, 26.064.563 pasajeros lo hicieron desde o hacia el aeropuerto Arturo merino Benítez, lo que equivale al 92,5% del tráfico total nacional (BD_Trafico_aereo-2014-2025 [Base de datos], 2025). Esta cantidad de pasajeros transportados por SCEL representa un máximo histórico para el principal aeropuerto en Chile que, además, fue el principal punto de ingreso para los turistas extranjeros que visitaron el país, representando el 43,9%⁴ del flujo total del año 2024.

El transporte de los más de 26 millones de pasajeros fue posible gracias a los 164.259 vuelos comerciales que despegaron o aterrizaron en el aeropuerto Arturo Merino Benítez durante todo el 2024, la cifra más alta en la historia del aeropuerto (Panel Interactivo – Operaciones de Aeronaves, 2025).

Estas cifras históricas para SCEL son un ejemplo evidente de la tendencia al alza que se viene repitiendo los últimos años en cuanto a la cantidad de pasajeros transportados y número de operaciones realizadas en el aeropuerto. Desde el año 2015, sin considerar el año 2020 por motivos de pandemia Covid-19, el aeropuerto ha mantenido un crecimiento anual por sobre el 5% en la cantidad de pasajeros transportados y un crecimiento por sobre el 4% en la cantidad de operaciones comerciales y de carga realizadas por año.

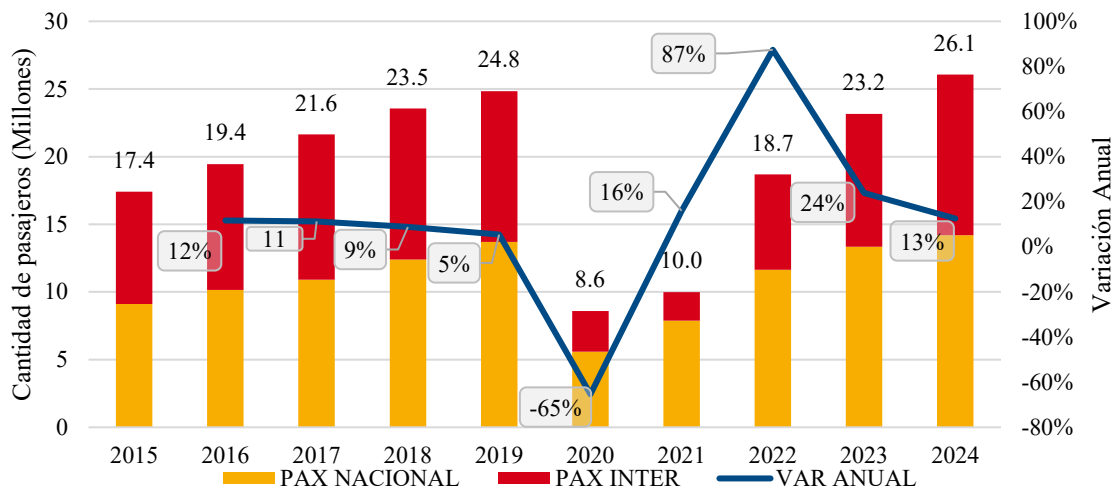


Gráfico 1.1 Cantidad de pasajeros transportados por año en SCEL y su variación anual.

⁴ Datos disponibles en [Turismo receptivo: Llegadas de turistas extranjeros - Sernatur](#) (Servicio Nacional de Turismo (Sernatur), 2025)

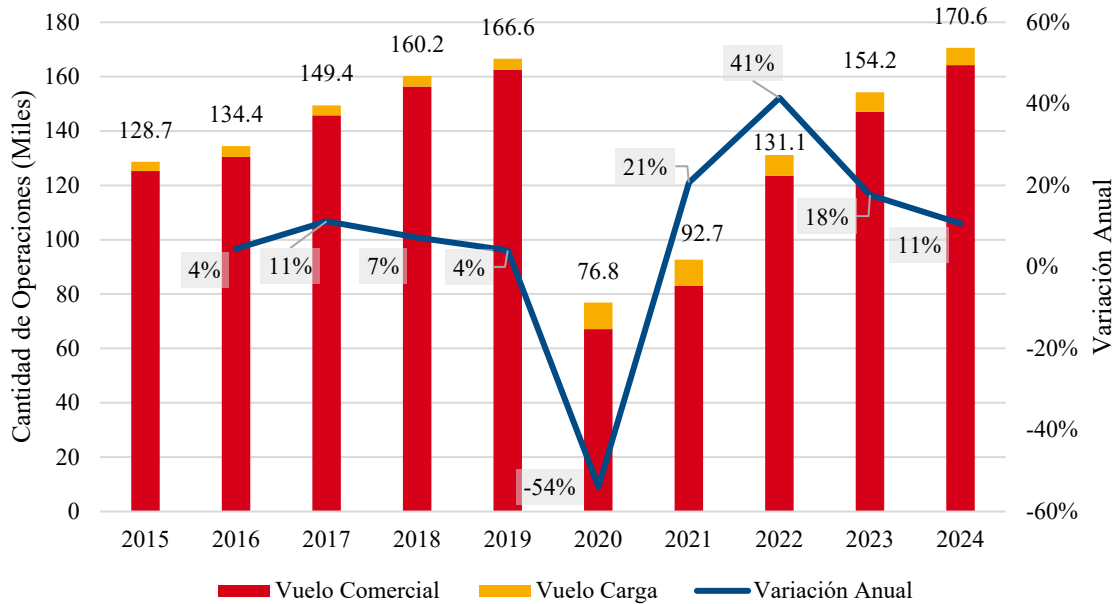


Gráfico 1.2 Cantidad de operaciones realizadas por año en SCEL con su variación anual.

De mantenerse la tendencia de crecimiento anual en la cantidad de pasajeros transportados, para el año 2030 el aeropuerto alcanzaría niveles de demanda por sobre lo proyectado en el último estudio realizado por motivo de actualización del plan maestro actual, lo que provocaría la saturación de los terminales en el año 2027, 3 años antes que el planificado en el plan maestro 2030.

De la mano con el aumento en la cantidad de pasajeros transportados, la infraestructura horizontal del aeropuerto enfrenta sus propios desafíos de cara al aumento en la cantidad de operaciones que se realizarán en los próximos años. De mantenerse el crecimiento observado en los últimos 10 años, el aeropuerto SCEL superaría las 200.000 operaciones anuales antes del 2030, año en el cual, el aeropuerto requerirá absorber un total de 51 operaciones por hora, versus las 41 operaciones que se registraron en las horas de mayor congestión durante 2024. Es de vital importancia identificar si dichas horas de mayor congestión son eventos frecuentes o más bien esporádicos ya que la cantidad de operaciones que se registran en estas horas de gran congestión son de vital importancia para entender si el aeropuerto se encuentra operando sobre o debajo su capacidad operacional máxima.

De acuerdo con las proyecciones presentadas en la actualización del plan maestro, el aeropuerto internacional Arturo Merino Benítez tendrá una demanda de 62 operaciones por

hora para 2033, de 69 operaciones para el año 2035 y un total de 112 operaciones por hora para el año 2045⁵.

Actualmente, la capacidad declarada para el aeropuerto Arturo Merino Benítez es de 29 operaciones por hora para la pista 17L y 17R por separado, aumentando a un total de 53 operaciones por hora con ambas pistas operando de manera simultánea⁶, cantidades que no alcanzarán para abarcar la demanda que se proyecta a futuro, por lo que evaluar y determinar nuevos parámetros de operación en espacio aéreo además de la infraestructura horizontal del aeropuerto son desafíos que deben ser analizados para poder aumentar la capacidad operacional del aeropuerto y permitir un funcionamiento libre de demoras significativas en aquellas horas donde la demanda no puede ser atendida de manera óptima.

Para poder evaluar distintas alternativas que permitan mejorar la capacidad de operaciones en horas de gran congestión es importante entender el impacto que tiene esta limitación operacional y que factores influyen en el aumento o disminución de dicha limitación, por lo que entender los fundamentos de dicho concepto son de vital importancia para comprender la relevancia que un estudio como este tiene en la operatividad de un aeropuerto además de conocer los métodos que existen para poder determinar esta capacidad máxima.

Evaluar y probar diferentes estrategias que tengan como objetivo aumentar la capacidad operacional de un aeropuerto implicarían, de ser aplicadas, un aumento en la oferta de vuelos disponible en horas de alta demanda sin provocar retrasos en la operación, incrementando así los slots disponibles que tiene el operador para poder licitar entre los operadores interesados, generando una mayor capacidad de oferta por parte de las aerolíneas lo que llevaría a un aumento en la capacidad de conectividad para los pasajeros.

⁵ (SCL1-20-GE-GN-IN-002 Actualización Plan Maestro Aeropuerto Arturo Merino Benítez de Santiago y Estudio Localización NAMZC, 2021)

⁶ (ENR 1.9: Organización de la gestión de afluencia del tránsito aéreo (ATFM), 2023)

1.2. Objetivos

Los objetivos que se detallarán a continuación son los que guiarán todo este análisis y los que le entregarán el enfoque a la investigación.

1.1.1. Objetivo general:

Determinar la capacidad máxima de operaciones por hora teórica que puede tener el Aeropuerto Internacional Arturo Merino Benítez mediante el uso del software de simulación **SIMMOD PRO**.

1.2.1. Objetivos secundarios:

Los objetivos secundarios de este análisis serán los siguientes:

1. Analizar el impacto en la cantidad de operaciones máximas por hora al ajustar variables clave durante la aproximación y ocupación de pista.
2. Comparar resultados de la simulación, del escenario actual y escenario con modificaciones, con los valores proyectados en el plan maestro de SCEL.
3. Generar una guía básica de como modelar y realizar simulaciones con el software **SIMMOD PRO**.

Al desarrollar el objetivo principal y los objetivos secundarios de esta memoria se busca determinar, gracias a una herramienta de simulación, la cantidad de operaciones aéreas (Despegues/Aterrizajes) que se podrían realizar, en las horas de mayor congestión, en el aeropuerto internacional Arturo Merino Benítez con la infraestructura actual y con aquellas modificaciones a las variables clave involucradas en la capacidad operacional.

El poder determinar la capacidad operacional máxima por hora que tiene un aeropuerto sirve como evidencia para que las autoridades puedan dimensionar la situación en la que se encuentra SCEL y así poder tomar decisiones preventivas para enfrentar una posible saturación de la infraestructura horizontal del aeropuerto.

Existen ejemplos a nivel internacional de medidas que se pueden implementar en un aeropuerto y su espacio aéreo correspondiente para poder aumentar la capacidad de operaciones por hora, como reducir los tiempos de ocupación de pista, disminuir las separaciones horizontales entre aeronaves en aproximación, aumentar velocidades en aproximación y desocupación de pista y reorganizar el tipo de uso y configuración de las pistas.

1.3. Metodología

A lo largo de esta memoria la metodología a utilizar consiste en tres partes principales:

1.3.1. Recopilación normativa nacional e internacional.

Esta etapa de la metodología está enfocada en realizar toda la investigación sobre normativa nacional e internacional que regulan y restringen las operaciones aéreas en etapas de aproximación, aterrizaje, despegues y tránsito por calles de rodaje. Dentro de esta etapa se debe tener en consideración toda la información reglamentaria nacional que fiscaliza la Dirección General de Aeronáutica Civil (DGAC) la cual se encuentra disponible en la página web oficial⁷.

Además, se debe considerar toda la normativa internacional que regula las operaciones en suelo nacional ya que Chile es miembro de la OACI. La información correspondiente a operaciones aéreas y aeropuertos se encuentra en el Anexo 14⁸ y DOC 8168⁹.

Existe documentación adicional emitida por la International Air Transport Association (IATA) o la Federal Aviation Administration (FAA) que puede ser pertinente al desarrollo de la memoria.

1.3.2. Levantamiento de variables claves para la modelación, SCEL.

Una vez recopilada toda la información que norma y regula el tema a tratar en esta memoria, se continua con toda la recopilación sobre los parámetros que contribuyen a la modelación del espacio aéreo y estructura horizontal del aeropuerto SCEL. Dentro de la información que debe ser recopilada se encuentra toda la información aeronáutica oficial disponible en el AIP Chile, relacionada con los procedimientos estandarizados de llegadas (STAR), salidas (SID) y aterrizajes (IAC) además de información sobre pistas de aterrizaje, calles de rodaje y puertas de embarque¹⁰. Además, se debe recopilar, mediante la herramienta SkyWise¹¹, toda la información estadística sobre tiempos y velocidades en la aproximación y uso de pista con el fin de poder alimentar la herramienta de simulación a utilizar. Además, se utiliza bitácora de operaciones de SCEL entregada por DGAC¹² para analizar todos los vuelos realizados

⁷ Sitio oficial Norma DGAC. [Normativa para Opinión – DGAC | Dirección General de Aeronáutica Civil](#)

⁸ Anexo 14 OACI (Annex 14, Aerodromes - Volume I - Aerodrome Design and Operations, 2022)

⁹ (Doc 8168, Procedures for Air Navigation Services - Aircraft Operations Volume I - Flight Procedure, 2018)

¹⁰ Información disponible en (AIP-Chile Vol. I: AD 2 SCEL – Aeródromo Arturo Merino Benítez (AMDT 63))

¹¹ Plataforma de monitoreo aeronáutico [Skywise Core \[X \] | Airbus](#)

¹² Bitácora de operaciones (Dirección General de Aeronáutica Civil, 2024)

durante el año 2024 y determinar aeronave tipo, distribución del uso de pistas, cuota de mercado por aerolínea y tipos de aeronave que operan en el aeropuerto.

1.3.3. Modelación y simulación de SCEL en Simmod Pro!.

Para finalizar, se modelará el escenario actual de SCEL en **Simmod Pro!**¹³ gracias a toda la información anteriormente mencionada y recopilada. Una vez modelado el escenario de SCEL y realizada la simulación, se compararán los resultados obtenidos con la capacidad operacional máxima declarada en la actualidad por la autoridad pertinente. Una vez comparados los resultados con el escenario actual, se modificarán variables controlables del escenario estudiado para cuantificar el impacto que tienen estas modificaciones en la capacidad operacional en comparación a los resultados obtenidos del escenario actual.

Una vez realizados todos los puntos de esta metodología, se busca abarcar todos los factores que influyen en la capacidad operacional máxima que tiene un aeropuerto con el fin de reflejar, de la manera más realista posible, el escenario actual en el cual se encuentra el aeropuerto SCEL además de poder identificar espacios de mejora.

¹³ Herramienta de simulación aérea [Simmod PRO! - ATAC](#)

1.4. Alcance

Con el fin de poder dar respuesta a los problemas planteados como objetivo general y secundarios, esta memoria utiliza más de un tipo de investigación para poder responder cada uno de los objetivos planteados.

Para poder responder el **objetivo general** de la memoria, se desarrolla una investigación de tipo descriptiva y explicativa, ya que se detalla y plasma la condición actual en la que se encuentra el aeropuerto SCEL, pero también se profundiza en todas aquellas variables que influyen en la capacidad operacional que tiene el aeropuerto y como estas condicionan el número de operaciones por hora que se pueden realizar.

Debido a que el objetivo general se centra en la situación actual de SCEL, la investigación abarca exclusivamente el aeropuerto y su espacio aéreo correspondiente (TMA) y tiene un límite temporal que se encuentra relacionado con la infraestructura actual de SCEL y su espacio aéreo, es decir, cualquier cambio a una variable que sea parte de la estructura del espacio aéreo o en la infraestructura horizontal del aeropuerto que esté relacionada con la capacidad operacional dejaría fuera de sus límites temporales a el análisis realizado en esta memoria.

Una vez realizada la investigación y desarrollo del objetivo general de la memoria, se debe continuar con los **objetivos secundarios**, los cuales serán desarrollados mediante el uso de la investigación explicativa ya realizada anteriormente en el desarrollo del objetivo general, además de una investigación proposicional que busca responder aquellos objetivos enfocados en la modificación de variables claves con el fin de proponer cambios en el espacio aéreo y/o en la estructura horizontal del aeropuerto que ayuden a mejorar la capacidad operacional actual del aeropuerto. A diferencia del objetivo general, los objetivos secundarios tienen como meta entregar modificaciones con una vida útil de largo plazo que no se vean afectadas por la creación de nueva infraestructura horizontal en el aeropuerto o un cambio en la estructura del espacio aéreo, por lo que su horizonte temporal está ligado con el avance de la tecnología de navegación aérea y de la normativa internacional al respecto.

2. Capítulo 2: Estado del arte

2.1. Antecedentes

Para poder profundizar en el estudio de la capacidad operacional de un aeropuerto es importante hacer ciertas diferenciaciones y definir conceptos que ayudarán a la contextualización del tema a tratar en esta memoria.

Cuando se habla de la capacidad que tiene un aeropuerto es importante diferenciarla en función de la infraestructura y el tipo de uso que se le da. En términos macros existen dos tipos principales de capacidad aeroportuaria, aquella relacionada con los terminales de pasajeros, salas de embarque y check-in más conocida como capacidad terminal y la capacidad operacional que está relacionada con la cantidad de operaciones que se pueden realizar en determinado aeropuerto y su espacio aéreo correspondiente, considerando la cantidad de pistas, calles de rodaje y puertas de embarque que posee. Es importante destacar que en la actualidad también se realizan estudios de capacidad operacional separando lo que es lado aire de un aeropuerto, es decir, pistas de aterrizaje y calles de rodaje, con la capacidad que tiene el espacio aéreo (TMA) en función de los procedimientos estandarizados de aproximación y salidas que tiene un aeropuerto o respecto a la capacidad de control ATC que tiene determinado espacio aéreo. Para el caso de esta memoria se analiza la capacidad que tienen en conjunto el lado aire (Pistas, calles de rodaje, puertas de embarque) y espacio aéreo (Procedimientos estandarizados) bajo las condiciones actuales del aeropuerto SCEL.

Una vez detalladas las diferencias entre los distintos tipos de capacidad, es importante ahondar en la capacidad operacional e identificar las variables clave que la afectan.

Dentro de la infraestructura del lado aire y espacio aéreo de un aeropuerto se pueden identificar las siguientes variables que tienen un impacto en la capacidad operacional:

- Cantidad, configuración y modo de operación de las pistas en un aeropuerto.
- Tiempo de ocupación de pista.
- Ubicación y diseño de las calles de rodaje.
- Cantidad y ubicación de las puertas de embarque.
- Velocidades en aproximación.
- Cantidad y diseño de los procedimientos (STAR, SID, IAC).
- Separaciones horizontales por normativa y por estela turbulenta.
- Dependencias entre las trayectorias de llegada/salidas en el espacio aéreo.

De todas las variables mencionadas anteriormente, la que tiene un mayor impacto en la cantidad de operaciones que se pueden realizar en un aeropuerto, es la cantidad y configuración de las pistas de aterrizaje/despegue.

De acuerdo con las metodologías de capacidad operacional presentadas por la FAA¹⁴ y la normativa vigente sobre operaciones instrumentales simultaneas en pistas paralelas¹⁵ de la OACI, la mayor cantidad de aterrizajes y despegues se logran al operar con una configuración de pistas paralelas independientes *“Theoretical studies indicate that the maximum arrival capacity may be achieved by operating independent parallel approaches”* (1.3.3, 2020, pág. 17).

Otros factores como la ubicación y diseño de las calles de rodaje, tiempo de ocupación de pista, velocidades en la aproximación y la disponibilidad y diseño de los procedimientos de aproximación y despegue, son variables claves que influyen en la determinación de la capacidad operacional de un aeropuerto ya que son elementos que se consideran en los diversos métodos de cálculo de capacidad operacional.

Es por estos motivos que el objetivo principal de un aeropuerto con 2 o más pistas de aterrizaje, como lo es el caso de SCEL, es lograr operar con una configuración de pistas paralelas e independientes para así poder obtener y definir una capacidad operacional teórica mayor de acuerdo con los modelos matemáticos y softwares de simulación.

En la actualidad, existen diversas opciones para poder calcular la capacidad operacional de un aeropuerto las cuales se dividen en 2 grupos principales:

Metodologías matemáticas:

Son alternativas más básicas y simples para determinar la capacidad operacional de un aeropuerto, pero tienen la limitación de no poder considerar una alta cantidad de variables en sus ecuaciones por lo que los resultados generalmente son más genéricos y rígidos. Algunas de estas metodologías son las siguientes:

- Advisory Circular N° 150/5060-5 *“Airport Capacity and Delay”*: Metodología recomendada por la FAA.

¹⁴ Airport Capacity and delay (United States Department of Transportation, Federal Aviation Administration, 1983)

¹⁵ (Doc 9643, Manual on Simultaneous Operations on Parallel or Near-Parallel Instrument, 2020)

- “*Guía para la aplicación de una metodología común para el cálculo de capacidad de aeropuerto y sectores ATC para la región SAM*”: Metodología utilizada en los aeropuertos brasileros declarada en el documento OACI RLA/06/901 y que es recomendada por la OACI para la región sudamericana (SAM)¹⁶.

Softwares de simulación:

Permiten la creación de diversos escenarios de un mismo aeropuerto además de permitir evaluar el impacto que tienen los cambios en parámetros claves dentro de la simulación.

Algunos de estos softwares son los siguientes:

- Simmod Pro: Desarrollado por ATAC.
- AirTOP: Software desarrollado por Transoft Solutions¹⁷.
- RunwaySimulator: Herramienta de simulación desarrollada por MITRE¹⁸.

Debido a las variadas herramientas disponibles para determinar la capacidad operacional de un aeropuerto, se deben evaluar todas estas para poder identificar ventajas o debilidades entre ellas además de buscar otros análisis de capacidad operacional desarrollados con estas herramientas matemáticas y de simulación para poder determinar qué resultados se adecuan de mejor manera a lo que se busca en esta memoria.

¹⁶ Metodología propuesta para la región SAM (Arca Jaurena R. , 2009)

¹⁷ Página oficial del producto. [AirTOP - Aviation Management Software | Transoft Solutions](#)

¹⁸ Descripción de la herramienta [runwaySimulator Airport Capacity Model | Federal Aviation Administration](#)

2.2. Marco teórico

2.2.1. Normativa regulatoria nacional e internacional.

Con el objetivo de maximizar la capacidad operacional que tiene el aeropuerto SCEL con la infraestructura horizontal y disponibilidad de procedimientos estandarizados de salida y llegada actual, es fundamental revisar la normativa nacional para determinar si el aeropuerto SCEL es capaz de operar con 2 pistas paralelas independientes consiguiendo así, la mayor eficiencia posible (1.3.3, 2020, pág. 17).

Teniendo este objetivo en mente, es fundamental revisar en la normativa chilena documentos como la norma aeronáutica DAN 14 154¹⁹, inspirada en el anexo 14 de la OACI²⁰, que es la encargada, entre otras cosas, de establecer los parámetros requeridos para el diseño de aeródromos y por lo tanto define la separación mínima que debe existir entre los ejes de pistas paralelas para operar de manera simultánea e independiente.

Respecto a este último punto, y en función de la categoría del aeropuerto, se establece que la distancia entre ejes de pistas paralelas debe ser mayor a 210 [m] en condiciones VFR y superior a 1.035 [m] en condiciones de IFR para un aeropuerto categoría 4E como lo es en este caso SCEL.

En este mismo documento se establecen los requerimientos que debe cumplir una calle de rodaje para poder ser considerada de salida rápida, los cuales son:

- El ángulo de intersección de la calle de rodaje de salida rápida con la pista no debe ser mejor a 25° ni mayor a 45° siendo 30° el ángulo preferente.
- Para aquellas calles de salida rápida con numero de clave 3 o 4, el radio de curva de viraje no debe ser menor a 550 [m] para poder ser transitadas a 93 [km/h] en condiciones de pista mojada.
- Para aquellas calles de salida rápida con numero de clave 1 o 2, el radio de curva de viraje no debe ser menor a 275 [m] para poder ser transitadas a 65 [km/h] en condiciones de pista mojada.

¹⁹ Documento oficial [DAN-14_154_ED1ENM1_09MAYO2023.pdf](#)

²⁰ (Annex 14, Aerodromes - Volume I - Aerodrome Design and Operations, 2022)

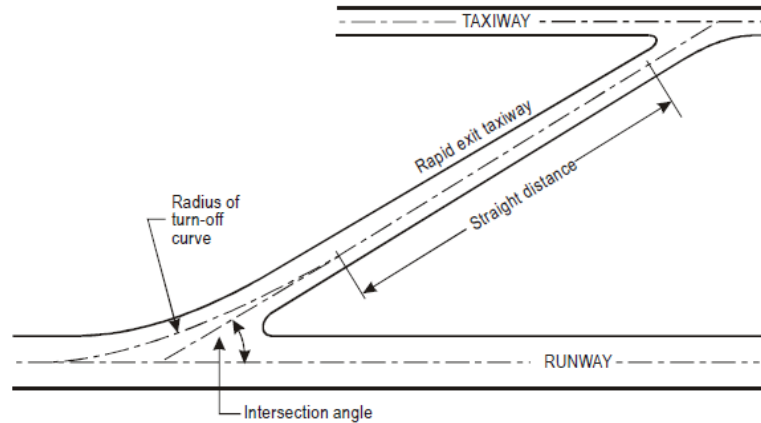


Imagen 2.1 De (Figure 3-3. Rapid exit taxiway, 2022, pág. 78)

Continuando con otro punto importante a la hora de determinar si el aeropuerto SCEL puede operar con sus 2 pistas de manera simultánea e independiente es evaluar los procedimientos de aproximación y salidas que se encuentran disponibles para este aeropuerto y ver si cumplen con los requerimientos básicos exigidos por la norma.

Para poder entender de mejor manera los requisitos que exige la norma encargada de regular las aproximaciones paralelas es necesario clarificar cómo funciona y se ordenan las operaciones en el espacio aéreo (TMA).

Con el objetivo de ordenar, guiar y optimizar la cantidad de aeronaves que llegan o salen de un aeropuerto, a mediados del siglo pasado se comenzaron a publicar los primeros procedimientos de aproximaciones instrumentales a aeropuertos, que luego serían reconocidos como Instrumental Approach Course, de ahora en adelante denominadas IAC, que entregan información operacional crítica a los pilotos. Con el paso de los años se introduce en el manual Doc. 8168 (PANS-OPS)²¹ de la OACI los procesos y requisitos para la creación de procedimientos estandarizados de llegada a un aeropuerto, conocidos como Standar terminal Arrival Route, de ahora en adelante STAR, y los procedimientos estandarizados de salida conocidos como Standar Instrumental Departure, de ahora en adelante SID.

A la hora de crear un procedimiento estandarizado, ya sea de salida o llegada, lo que se busca es asegurar siempre la seguridad operacional, minimizar tiempos de operación, otorgar una

²¹ (Doc 8168, Procedures for Air Navigation Services - Aircraft Operations Volume I - Flight Procedure, 2018)

trayectoria libre de obstáculos y considerar la mayor cantidad de categorías de aeronaves como sea posible.

Para conseguir estos objetivos los manuales de la OACI consideran una gran cantidad de parámetros que deben ser estudiados durante la creación de estos procedimientos tales como:

- Separación con obstáculos cercanos al aeropuerto.
- Requerimientos de categoría navegación.
- Limitación de ascenso o gradiente de ascenso (Ideal 3.3%).
- Evitar conflictos con llegadas u otras salidas.
- Facilitar la transición a aerovías (en ruta).
- Consideraciones especiales por ruido y protección ambiental.

Una vez considerados todos los puntos anteriormente enlistados se puede realizar el procedimiento para luego ser publicado por la autoridad local.

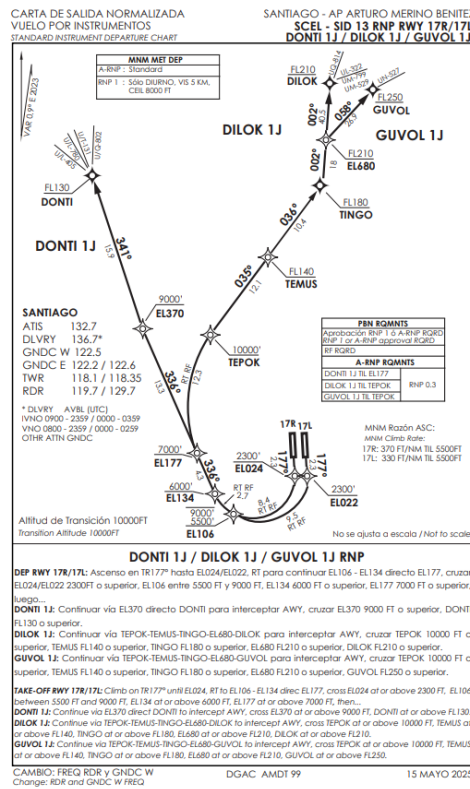


Imagen 2.2 Carta de salida normalizada por instrumentos SID para el aeropuerto SCEL.

Nota: De (AIP-Chile VOL II AMDT N° 99, 2025, pág. 694)

En el caso de las STAR, algunos de los factores importantes a tener en consideración pueden ser los siguientes:

- Capacidad de secuenciar múltiples aeronaves en descenso
- Puntos de restricción de altitud y velocidad.
- Facilitar la transición desde aerovías (En ruta).

Uno de los objetivos de las STAR es poder conectar las aerovías cercanas a un aeropuerto con las IAC y así permitir un flujo estandarizado a lo largo de un vuelo.

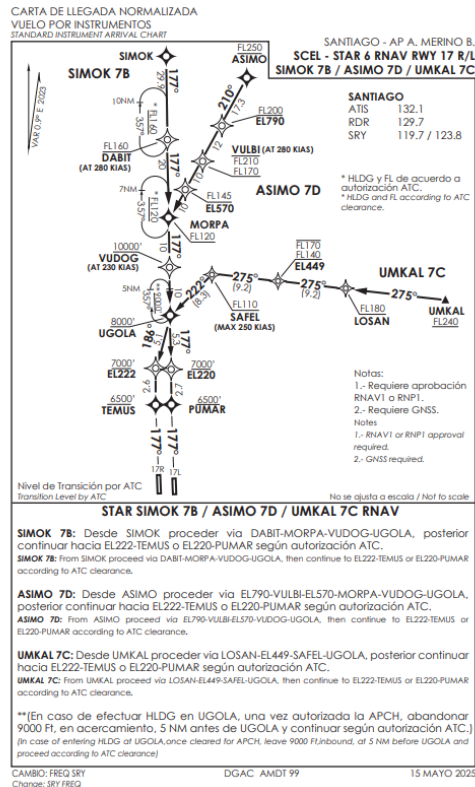


Imagen 2.3 Carta de llegada normalizada STAR que ordena flujo del norte y este para aeropuerto SCEL.

Nota: De (AIP-Chile VOL II AMDT N° 99, 2025, pág. 678)

Pasando finalmente a la IAC, existen muchos factores a considerar en esta fase ya que es probablemente la etapa más crítica de un vuelo. Algunos de estos parámetros pueden ser:

- Tipos de aproximación (ILS, VOR, RNAV, RNP-AR, etc.)
- Mínimos de visibilidad y altitud de decisión (DA/MDA)
- Trayectorias de missed approach.
- Gradiente de descenso controlada (Idealmente 5,2%).

Es importante destacar que, dependiendo el tipo de aproximación y método de navegación utilizado, los mínimos de visibilidad y techo de nubes pueden variar considerablemente para un mismo aeropuerto por lo que, dependiendo de lo adverso del clima en el aeropuerto,

resulta conveniente tener sistemas más avanzados de aproximación para así permitir que el aeropuerto se encuentre operativo la mayor parte del año.

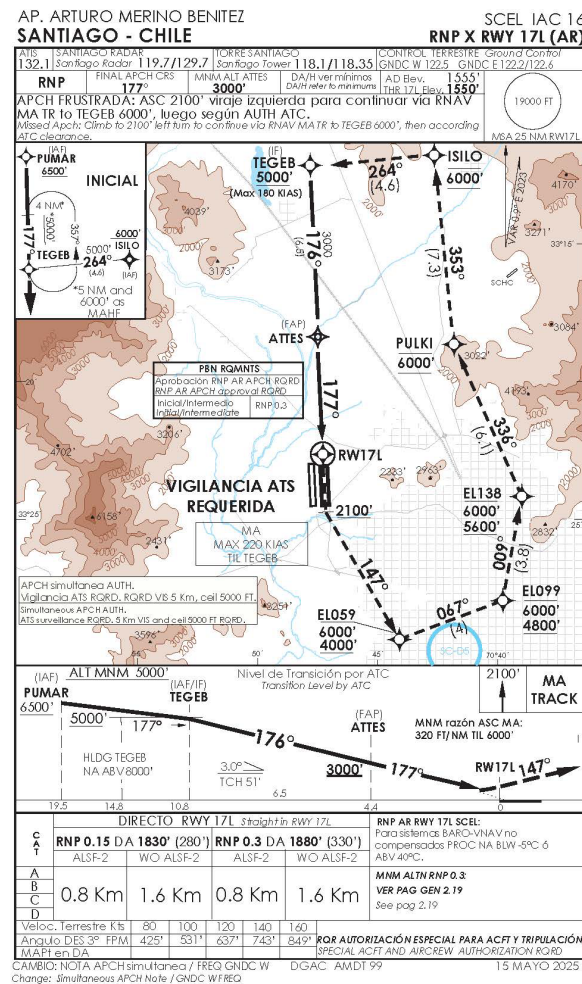


Imagen 2.4 Carta de aproximación (IAC) RNP (AR) autorizada para APP simultaneas SCEL.

Nota: De (AIP-Chile VOL II AMDT N° 99, 2025, pág. 711)

Una vez presentados los procedimientos estandarizados SID, STAR e IAC se deben analizar los criterios que estos procedimientos deben cumplir entre sí para permitir aproximaciones paralelas independientes a un aeropuerto.

Dentro de los requerimientos declarados en el documento OACI 9643²², se incluyen algunos relacionados a la capacidad de vigilancia de los servicios de tránsito aéreo (ATC) que no son de relevancia para el desarrollo de la simulación ya que no son parametrizables en el software por lo que no se tienen en consideración.

²² (Doc 9643, Manual on Simultaneous Operations on Parallel or Near-Parallel Instrument, 2020, págs. 20-21)

Los requerimientos que si son relevantes para la simulación son aquellos relacionados con las separaciones que deben existir entre las derrotas de las aeronaves que se encuentran aproximando a pistas paralelas. Se debe cumplir con una separación lateral compuesta por una zona de no transgresión (NTZ) que típicamente es de 610 [m], y por la zona NOZ que consiste en las 2 zonas internas de las protecciones laterales exigidas en el tipo de procedimiento que se está realizando. Además, se debe cumplir con una separación vertical de al menos 1.000 [ft] entre aeronaves o una separación horizontal de 3 [nm] entre las aeronaves en aproximación.

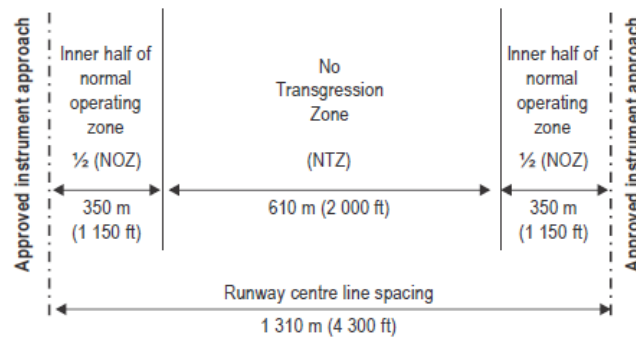


Imagen 2.5 De (Figure 2-3. NOZ and NTZ example for one runway centre line spacing, 2020, pág. 27)

Para el caso de las salidas simultaneas paralelas en pistas separadas entre 1.525 [m] y 760 [m], se debe cumplir con una divergencia no menor a 15° inmediatamente después del despegue o una divergencia no menor a 10° cuando ambas aeronaves están volando una SID RNAV o RNP y el viraje comienza antes de las 2 [nm] desde el fin de la pista de despegue. Para pistas que se encuentran separadas por más de 1.525 [m] debe existir una divergencia de 45°o más entre las derrotas de las aeronaves

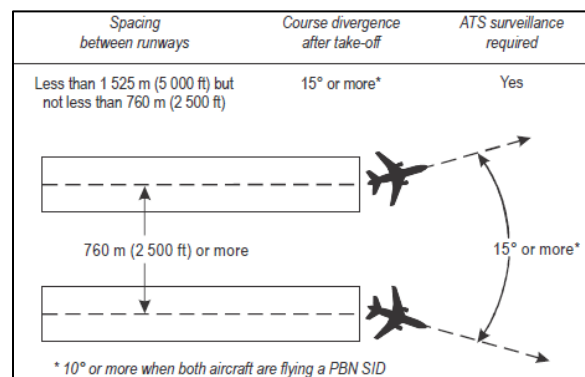


Imagen 2.6 De (Figure 3-1. Independent instrument departures when parallel runway spacing is less than 1 525 m (5 000 ft) but no less than 760 m (2 500 ft), 2020, pág. 42)

Spacing between runways	Course divergence after take-off	Radar required
1 525 m (5 000 ft) or more	45°	No

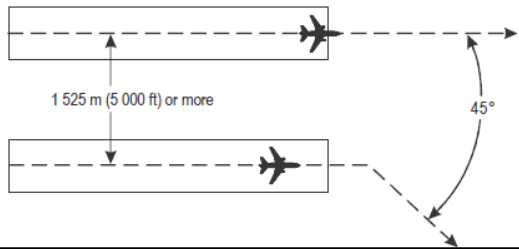


Imagen 2.7 De (Figure 3-1. Independent instrument departures when parallel runway spacing is less than 1 525 m (5 000 ft) but no less than 760 m (2 500 ft), 2020, pág. 42)

Con toda la regulación anteriormente presentada se cubren todos los aspectos normativos que el aeropuerto internacional Arturo Merino Benítez debe cumplir para poder operar con pistas paralelas independientes por lo que en el **Capítulo 3: Desarrollo** se realiza el análisis para determinar si el escenario actual de SCEL cumple con la reglamentación descrita.

2.2.2. Métodos para la determinación de la capacidad operacional.

Con el aumento en la demanda por vuelos comerciales alrededor del mundo, los aeropuertos alcanzaron de manera apresurada la saturación de la infraestructura horizontal existente en la época, y las posibilidades de expansión eran la mayor limitante en la posibilidad de aumentar el flujo de aeronaves y pasajeros en los principales aeropuertos del mundo. Por estos motivos entidades gubernamentales e internacionales como la OACI y la FAA crearon sus primeros lineamientos que tenían como objetivo crear procedimientos estandarizados para poder determinar la capacidad operacional de un aeropuerto además de identificar aquellas variables que tenían un impacto significativo en la cantidad de operaciones por hora que se podían realizar.

Metodología FAA:

Bajo este contexto es que se crea la Advisory Circular N° 150/5060-5 “*Airport Capacity and Delay*” de la FAA con fecha 23/09/1983, que explica como calcular la capacidad de un aeropuerto. Este documento forma parte de las metodologías matemáticas que existen para poder determinar la capacidad operacional de un aeropuerto. En este documento se detallan 2 metodologías para el cálculo de la capacidad de un aeropuerto, las cuales se diferencian entre si debido a los supuestos bajo los cuales se trabaja y el enfoque más general que tiene la primera metodología.

La primera y más básica metodología recomendada por la FAA necesita como inputs los tipos de aeronave que operaron, operan y operarán en el aeropuerto en estudio y su respectiva participación en el total de operaciones anuales. Con esta información se debe calcular el **índice de mezcla** que servirá para obtener la capacidad operacional del aeropuerto de acuerdo con la configuración de pistas con la que se opera.

Las categorías de aeronaves utilizadas en esta metodología son las siguientes:

Categoría de Aeronave	MTOW [Kg]	Cantidad de motores
A	< 5.670	Único
B	< 5.670	Múltiple
C	5.670 - 136.000	Múltiple
D	> 136.000	Múltiple

Tabla 2.1 Clasificación de aeronaves, Advisory Circular N° 150/5060-5, FAA.

Una vez determinada la participación que tiene cada categoría de aeronaves en el flujo anual del aeropuerto en estudio, se debe determinar el índice de mezcla utilizando la siguiente formula:

$$\text{Índice de mezcla} = \%C + 3 * \%D$$

Ecuación 2.1 Formula para calcular índice de mezcla, Advisory Circular N° 150/5060-5, FAA.

Donde:

C= Porcentaje de operaciones realizadas por aeronaves con MTOW <= 136.000 [Kg]

D= Porcentaje de operaciones realizadas por aeronaves con MTOW > 136.000 [Kg]

Una vez calculado el índice de mezcla se debe seleccionar la configuración bajo la cual operan las pistas de aterrizaje en el aeropuerto de estudio y así obtener la cantidad de operaciones por hora para vuelos VFR, IFR y cantidad de operaciones anuales.

Es importante destacar que con esta metodología se realizan 5 supuestos que deben ser considerados al momento de analizar los resultados obtenidos. Estos supuestos son los siguientes:

- Cantidad de aterrizajes es igual a la cantidad de despegues.
- Porcentaje de Touch and Go equivale a un 0% de las operaciones.
- Cada pista de aterrizaje cuenta con una calle de rodaje paralela para desalojo de pista.
- No existen limitaciones en el espacio aéreo.
- El aeropuerto cuenta con al menos una RWY con sistema ILS equipado.

Como ejemplo, un aeropuerto con 2 pistas paralelas separadas por más de 3.400 [Ft] como lo es SCEL y con un índice de mezcla de 130 tendría una capacidad de:

- 103 vuelos por hora en condiciones VFR.
- 99 vuelos por hora en condiciones IFR.
- 370.000 operaciones anuales.


NO.	Runway-use Configuration	Mix Index *(C+3D)	Hourly Capacity Ops/Hr		Annual Service Volume Ops/Yr
			VFR	IFR	
4.		0 to 20	197	119	370,000
		21 to 50	149	113	320,000
		51 to 80	126	111	305,000
		81 to 120	111	105	315,000
		121 to 180	103	99	370,000

Imagen 2.8 Capacidad por hora y año para un aeropuerto tipo SCEL.

Nota: De (Figure 2-1 Capacity and ASV for long range planning, 1983, pág. 14)

Este método es el más básico ya que solo tiene en consideración el tipo de aeronave que predomina en el aeropuerto y la configuración de las pistas, sin considerar tiempos de aproximación, velocidades, separaciones horizontales o tiempo de ocupación de pista en función de las calles de rodaje disponibles.

La segunda recomendación metodológica presentada por la FAA en su circular incluye en su desarrollo la consideración de la capacidad base por hora, factor de touch & go y un factor de salidas que está relacionado a la disponibilidad de calles de rodaje que tiene cada pista ya sean de salida rápida o regulares.

La fórmula por utilizar en esta metodología es la siguiente:

$$\text{Capacidad por hora} = C * T * E$$

Ecuación 2.2 Formula para determinar la capacidad por hora de un aeropuerto, segunda metodología.

Donde:

C= Capacidad por hora base.

T= Factor de Touch & Go

E= Factor de salidas. Cantidad de calles de rodaje disponibles dentro de una determinada distancia desde el umbral de pista.

A continuación, se aprecian las tablas y gráficos necesarios para determinar la capacidad operacional por hora de un aeropuerto en función de los valores que adquieran las variables anteriormente mencionadas.

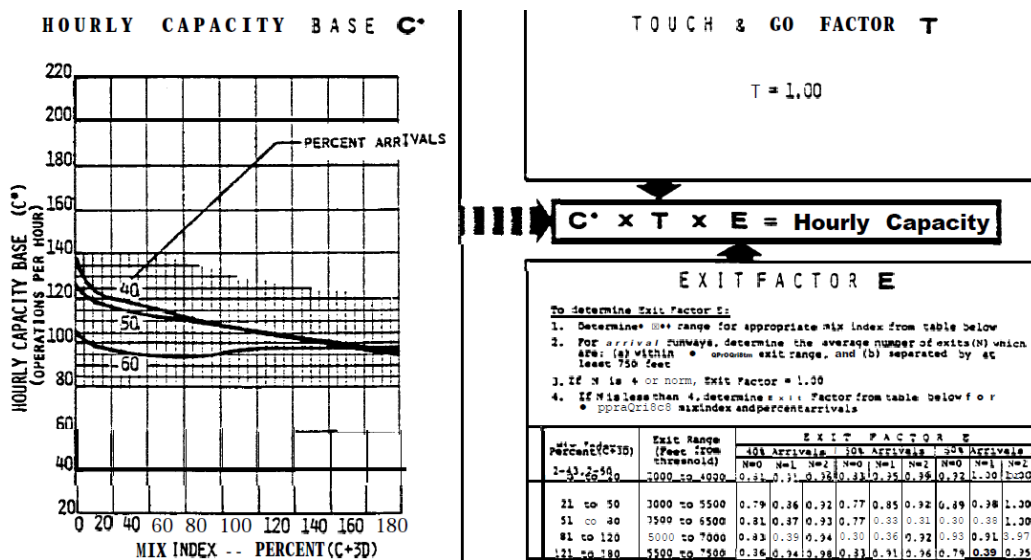


Imagen 2.9 Capacidad por hora de un aeropuerto tipo SCEL bajo condiciones IFR.

Nota: De (FIGURE 3-43. HOURLY CAPACITY OF RUNWAY-USE DIAGRAM NOS 1. 54 FOR IFR CONDITIONS, 1983, pág. 48)

Como ejemplo práctico, tomando en consideración un aeropuerto como SCEL, se debe utilizar la información entregada en la imagen anterior y gracias al índice de mezcla se puede determinar el valor de C^* y T , pero el valor de E se calcula teniendo en consideración los puntos planteados en la sección dedicada a esta variable.

Metodología brasilera: OACI RLA/06/901²³

“Este documento tiene como objetivo proporcionar a los estados de la región SAM una guía para la aplicación de una metodología común para el cálculo de capacidad de Aeropuerto y Sectores ATC” (I. Propósito, 2009, pág. 3)

Esta metodología supone que en determinada pista se realiza un despegue entre 2 aterrizajes consecutivos considerando las separaciones mínimas horizontales que son exigidas por la normativa local. La cantidad de operaciones que entrega como output es considerando un periodo de tiempo de 1 hora y teniendo en consideración los siguientes factores:

- **Factores de Planificación:**
 - Condiciones ideales de secuenciamiento y de coordinación de tránsito aéreo.
 - Todo el personal tiene el mismo desempeño y capacitación
 - Todos los sistemas de radio ayudan a la navegación y de ayudas visuales sin restricciones.
 - Equipos de comunicaciones VHF operando de manera normal.
- **Factores operacionales:**
 - Tiempos promedio de ocupación de pista
 - Mix de aeronaves.
 - Porcentaje de uso de umbrales de pista.
 - Longitud segmento de aproximación.
 - Separación horizontal reglamentaria entre aeronaves.
 - Configuración de las pistas y calles de rodaje.
 - Velocidades en la aproximación.

Teniendo todas estas variables en consideración se puede determinar la capacidad de una pista siguiendo los 16 pasos descritos en este documento.

²³ Metodología común para cálculo de capacidad región SAM (Arca Jaurena R. , 2009)

A diferencia de las metodologías presentadas por la FAA, este método tiene en consideración una mayor cantidad de variables que implican un levantamiento de información en terreno. Dentro de toda la información requerida para emplear esta metodología los 3 principales parámetros a tener en consideración serían el tiempo de ocupación de pista tanto para los despegues como los aterrizajes, idealmente en horario punta ya que existe una mayor fluidez de aeronaves disminuyendo los tiempos de ocupación; el mix de aeronaves que operan en el aeropuerto, y como último parámetro de mayor relevancia se encuentra la separación horizontal mínima que debe haber entre las aeronaves en aproximación, ya que esta distancia es la que determinará en qué momento la pista se encuentra bloqueada para realizar un despegue.

Softwares de simulación:

Debido a la necesidad de poder obtener resultados más personalizados respecto al aeropuerto en estudio y poder evaluar cambios y/o mejoras en las infraestructuras evaluadas de forma rápida es que, durante los años 90, gracias a los avances realizados en la industria de la computación, la FAA, aerolíneas y explotadores aeroportuarios comienzan a utilizar modelos computacionales para poder determinar las capacidades que tenían los aeropuertos de su interés. Estos modelos computacionales evolucionaron a lo que se conocen hoy en día como modelos de simulación aeroportuaria.

Dentro de las características y ventajas que tienen estas herramientas de simulación es la capacidad de realizar estudios simulando variados escenarios, dinámicas y estructuras de un aeropuerto gracias a las reglas definidas y/o modificadas por el usuario, con el fin de buscar mejoras en la capacidad operacional. Dentro de estos softwares existe la posibilidad de evaluar desde el funcionamiento de una pista con sus respectivas calles de rodaje y puertas de embarque, hasta el complejo espacio aéreo que conecta los distintos aeropuertos de una región.

Dentro del mercado de softwares de simulación los que más destacan son los siguientes:

AirTop:

Software desarrollado por Transoft Solutions que, mediante el uso de distintos módulos, permite simular desde un terminal de pasajeros hasta el TMA de un aeropuerto.

Este software le permite al analista modelar, simular y visualizar operaciones en determinado aeropuerto y espacio aéreo de manera rápida y eficiente. Esto permite que las organizaciones encargadas de estos sistemas aeroportuarios puedan evaluar las implicancias que generan los cambios operacionales o de infraestructura de antemano sin la necesidad de invertir altas sumas de dinero y tiempo en proyectos.

Debido a la amplia capacidad de simulación que ofrece esta herramienta, los productos se pueden adquirir de manera individual o en conjunto además de poder elegir el plazo de la adquisición.

Los módulos que ofrece Transoft Solutions son los siguientes:

- Terminal: Enfocado en el análisis de capacidad y performance de los terminales de pasajeros gracias a la modelación de procesos operacionales, personas y flujo de equipaje.
- Airside aircraft: Estudia las operaciones aéreas, revisa indicadores de eficiencia y permite analizar escenarios con el fin de optimizar procedimientos.
- Airside vehicle: Complementa los estudios realizados con la herramienta anterior agregando al modelo los movimientos realizados por los vehículos de apoyo terrestre.
- Runway Capacity analyzer: Modulo enfocado exclusivamente en la capacidad operacional de una pista considerando sus calles de rodaje.
- TMA/TRACOM: Busca aumentar la capacidad y performance del espacio aéreo terminal de un aeropuerto gracias a la modelación del flujo de aeronaves en los distintos procedimientos de llegada y salida de un aeropuerto.
- En route: Busca ayudar en la modelación y evaluación de los procedimientos en ruta.
- Flow management: Complemento a la modelación del tráfico aéreo que ayuda en la administración y balance entre la capacidad y demanda del flujo aéreo.
- Wizer ACC: Entrega resultados relacionados a la carga de trabajo de los controladores de tráfico aéreo.

Esta herramienta se encuentra en constante monitoreo y actualización por parte de Transoft Solutions y cuenta con asesoramiento experto durante y después del periodo de

entrenamiento. Debido a lo vanguardistas y competitivos que son sus módulos y la amplia disponibilidad de productos que ofrecen, los costos de adquisición de estas herramientas son elevados en comparación a su competencia.

Simmod Pro!:

Herramienta de simulación desarrollada por la empresa ATAC especializada en el mundo del análisis de las operaciones aéreas y que trabaja de la mano con entidades gubernamentales de los Estados Unidos tales como la FAA, NASA, Departamento de Defensa y Los Angeles World Airports, empresa dueña y encargada de operar el aeropuerto de Los Angeles (KLAX/LAX).

Al igual que Transoft Solutions, ATAC ofrece herramientas para las distintas necesidades que pueda tener el cliente ya sea el uso de su herramienta AEDT que se enfoca en el diseño de procedimientos operacionales con enfoque en el análisis de emisiones y ruido, o el uso de GRADO que es la herramienta de visualización, análisis, diseño y evaluación del tráfico aéreo.

Simmod Pro! es la herramienta enfocada en la modelación, simulación y cálculo de la capacidad operacional que tiene cualquier escenario simulado en el software ya sea espacio aéreo, pistas de aterrizaje o una combinación de ambas. Permite la simulación de días completos en solo minutos sin la necesidad de hardware especializado teniendo la posibilidad de simular varias iteraciones para poder comprender la variabilidad que tiene el escenario estudiado. Permite establecer valores y reglas para innumerables parámetros y procesos que ocurren dentro de la simulación para así poder evaluar los efectos que generan los cambios en los escenarios estudiados.

RunwaySimulator

Software desarrollado por MITRE que fue y es utilizado por la FAA para el cálculo de la capacidad operacional de los aeropuertos más importantes de EE. UU. Al igual que los anteriores softwares, RunwaySimulator simula vuelos de llegada y salida de un aeropuerto generando el tráfico suficiente hasta llegar a la saturación que es presentada en el output como una curva de Pareto en función de la cantidad de llegadas versus despegues. El tráfico simulado representa el mix de aeronaves ingresado por el analista considerando las

diferencias en performance, velocidades en aproximación y las separaciones horizontales por estela turbulenta entre las distintas categorías de aeronaves. A diferencia de las alternativas mencionadas anteriormente, RunwaySimulator solo se puede utilizar para la simulación de la capacidad de la pista ya que no considera limitaciones en otras partes del espacio aéreo o lado aire tales como, calles de rodaje, puertas de embarque o congestión en el TMA de un aeropuerto

Esta herramienta se encuentra disponible para el público siempre y cuando se realice el entrenamiento correspondiente.

Una vez presentadas las herramientas consideradas para el cálculo de la capacidad operacional de SCCL, se toma la decisión de considerar solo aquellas que utilizan un software para determinar la capacidad, ya que ofrecen una mayor personalización, realismo y dinamismo en el modelamiento del aeropuerto y su espacio aéreo. Gracias a su capacidad de modelamiento y control sobre las variables clave, los softwares de simulación son herramientas más completas en comparación a las metodologías matemáticas que se caracterizan por ser más simples y genéricas.

Dentro de los softwares de simulación existe una gran similitud en lo que ofrecen las distintas herramientas presentadas, por lo que resulta necesario identificar las ventajas, desventajas y diferencias entre ellas que justifiquen el uso de una por sobre las otras a la hora de determinar la capacidad operacional de SCCL.

A continuación, se presenta una tabla con el resumen de la evaluación realizada a los 3 softwares, teniendo en consideración aspectos claves definidos por el analista.

Software	Criterios	Capacidad de simulación	Facilidad de uso	Reconocimiento por entidades reguladoras.	Costo de adquisición	Outputs
AirTop		En función de los módulos adquiridos, AirTop te permite modelar y determinar la capacidad operacional del TMA y las pistas de aterrizaje o exclusivamente de las pistas de aterrizaje	Al momento de adquirir los diferentes módulos elegidos para el análisis, se debe realizar un curso obligatorio para aprender a utilizar la herramienta. Se cuenta con soporte y asesorías las 24 horas del día durante todo el tiempo que dure la contratación.	Pese a no contar con un certificado de reconocimiento, AirTop es una herramienta utilizada en diversos proyectos dentro de Europa, Asia y Estados Unidos siendo uno de sus clientes las FAA. Cumple con todos los criterios y más para ser considerando nivel 5 (el más alto) dentro de los "levels of modeling sophistication" de Airport Cooperative Research Program (ACRP Report 79) de FAA.	Al ser un software que funciona por módulos, los costos de adquisición pueden variar dependiendo las necesidades que se tiene en el estudio. Para un análisis como el desarrollado en esta memoria se tendría que contratar su herramienta de TMA que tiene un costo de más de \$17.000 USD además de los \$4.000 USD adicionales para el curso de capacitación con un máximo de 8 alumnos.	De las opciones evaluadas es el software con mayor variedad y detalle en sus outputs. Entrega documentos detallando los resultados además de tener gráficos para poder ver los resultados de manera visual.
Simmod Pro!		La herramienta permite modelar de manera exclusiva las pistas de aterrizaje, TMA o un conjunto de ambas considerando calles de rodaje y puertas de embarque.	Existe la posibilidad de contratar los servicios de capacitación con un costo adicional a la licencia, pero de manera gratuita existe una guía de uso básica que ayuda en la comprensión y uso del software. El no contar con el curso de capacitación aumenta considerablemente el tiempo y dificultad de uso de esta herramienta.	Cuenta con el nivel 5 (el más alto) dentro de los "levels of modeling sophistication" de Airport Cooperative Research Program (ACRP Report 79) de FAA ya que fue el software utilizado en este estudio realizado en 2012. Es utilizado por distintas organizaciones gubernamentales de Estados Unidos como la FAA y Nasa. y solicitado por la DGAC como herramienta exclusiva para las evaluaciones de proyectos aeronáuticos en Chile.	A diferencia de AirTop, Simmod Pro! vende el derecho a su licencia de por vida que tiene un costo de más de \$10.000 USD con un costo adicional por el curso de capacitación. Para el caso de esta memoria, la UTFSM cuenta con una licencia disponible para el uso de sus alumnos de manera gratuita con el uso de sus guías de uso básico disponible.	Cuenta con resultados relacionados a todos los parámetros modificables dentro del simulador, pero no son de fácil entendimiento y no son visualmente representativos. Resultados globales son más genéricos pero entregan toda la información requerida para esta memoria.
Runway Simulator		a diferencia de los softwares anteriores, esta herramienta solo permite la simulación y determinación de la capacidad operacional de las pistas de aterrizaje, no del TMA.	Curso de capacitación obligatorio que tiene un costo adicional al de la licencia del software. Al igual que las otras 2 alternativas, se hace en modalidad online.	No cuenta con una certificación directa al igual que AirTop, pero fue la herramienta utilizada por la FAA para determinar la capacidad operacional de sus aeropuertos en el último estudio realizado en 2014.	No se tiene la cifra exacta de cuánto cuesta la licencia de uso de este simulador, pero el costo de capacitación es de \$727 USD por estudiante.	Al contar solo con la capacidad de determinar la capacidad aislada de las pistas de aterrizaje los resultados solo entregan esa información. Cuenta con una representación gráfica de los resultados además de contar con documentos de resultados escrito.

Imagen 2.10 Tabla de evaluación de los softwares en base a criterios definidos por el autor.

Una vez evaluados los softwares en base a los criterios seleccionado por el autor, se entrega el detalle de la relevancia de cada criterio y el resultado de dicha evaluación:

Como criterio principal y de mayor peso se elige la capacidad de simulación que tiene cada herramienta. De las 3 opciones evaluadas, RunwaySimulator es la única que no tiene la capacidad de simular el TMA del aeropuerto por lo que en principio y a falta de los otros criterios de evaluación es una alternativa descartada. El segundo criterio más relevante para la evaluación serían los outputs disponibles en el software. En este caso el software más completo es AirTop ya que tiene una larga lista de resultados disponibles además de entregar información visual que agrega valor a los resultados, al igual que RunwaySimulator. La opción menos destacada en este criterio es Simmod Pro!.

Continuando con el tercer criterio más relevante, se consideran los costos de adquisición y capacitación. En este apartado Simmod Pro! se convierte en la mejor alternativa ya que la Universidad Técnica Federico Santa María cuenta con licencias disponibles para el uso de sus alumnos en proyectos de memoria como este. En el caso de las otras alternativas el alto costo de adquisición y capacitación son barreras definitivas que provocan el descarte de estas herramientas para el desarrollo de este proyecto debido a su contexto y naturaleza.

Continuando con los otros criterios de evaluación, todas las herramientas cuentan con el reconocimiento de organismos internacionales ya sean estatales o privados. Son herramientas utilizadas en todo el mundo por aeropuertos, aerolíneas y organismos del estado como la FAA en Estados Unidos y en el caso de Simmod Pro! es el software solicitado por la DGAC para las evaluaciones de proyectos acá en Chile.

En cuanto a la facilidad de uso y/o aprendizaje, todas las opciones cuentan con capacitaciones que tienen costos adicionales a la licencia de los softwares, pero Simmod Pro! es la única que además cuenta con manuales de libre acceso para poder entender mejor el uso de esta herramienta. Bajo el escenario de los altos costos de entrenamiento la posibilidad de tener una guía básica para entender el funcionamiento del software es una ventaja que Simmod Pro! tiene por sobre las otras alternativas pese a que, al no contar con los cursos de capacitación, la dificultad de su uso aumenta significativamente ya sea en horas de estudio como de desarrollo.

Es debido a todos los criterios anteriormente mencionados, sobre todo el coste económico de estas herramientas, y que es una herramienta conocida en el rubro de evaluaciones operacionales para los aeropuertos en Chile, que se toma la decisión de seleccionar como software de simulación en el desarrollo de esta memoria a Simmod Pro!.

2.2.3. Situación actual de la capacidad operacional en SCEL.

En la actualidad, el aeropuerto internacional Arturo Merino Benítez tiene declarada una capacidad operacional de 53 operaciones por hora utilizando ambas pistas simultáneamente y una capacidad de 29 operaciones por hora si se consideran las pistas por separado.

Aeropuerto (AP)/ Airport Aeródromo (AD)/ Aerodrome	Pista Runway	Código/ Code		Capacidad declarada de Pista (horaria) / Declared runway capacity (hourly)		
		IATA	OACI	DEP	ARR	TOTAL
AP Arturo Merino Benítez/Santiago SCEL	17R	SCL	SCEL	14	15	29
	17L			14	15	29
	AMBAS			26	27	53

Imagen 2.11 Capacidad declarada de las pistas de SCEL.

Nota: De (ENR 1.9: Organización de la gestión de afluencia del tránsito aéreo (ATFM), 2023, pág. 15)

De acuerdo con lo descrito en el reglamento de tránsito local de SCEL²⁴ y debido al flujo predominante que tiene, las pistas en uso serán la RWY 17L y RWY 17R considerando operaciones en modalidad segregada donde la RWY 17L es la pista utilizada para aterrizajes y la RWY 17R para despegues. Existe la posibilidad de efectuar aproximaciones paralelas independientes solo al utilizar procedimientos de aproximación ILS, RNP o RNP (AR) siempre y cuando este indicado en las cartillas de aproximación IAC.

Dentro del documento donde se encuentra esta información se describen los factores considerados para la determinación de la capacidad operacional de los distintos aeropuertos de Chile, la cual se enfoca en la capacidad de ATC en vez de la capacidad estructural del lado aire y sector TMA de un aeropuerto.

Esta metodología es la utilizada por el CGNA²⁵ en donde se describen los pasos requeridos para poder determinar la capacidad ATC de distintos sectores de control aéreo.

Esta capacidad operacional máxima declarada por DGAC estaría alcanzando su saturación entre los años 2030-2035 de acuerdo con las proyecciones de demanda presentadas en el documento de actualización del plan maestro²⁶.

²⁴ (AIP-Chile Vol. I: AD 2 SCEL – Aeródromo Arturo Merino Benítez (AMDT 63), 2025, pág. 9)

²⁵ (Manual de gestión de afluencia del tránsito aéreo, Manual ATFM CAR/SAM, 2010)

²⁶ (SCL1-20-GE-GN-IN-001 - INFORME FINAL PLAN MAESTRO AMB, 2021)

En este documento, se detallan de mejor manera las distintas metodologías que se pueden utilizar para determinar las capacidades operacionales de SCEL en la actualidad y en un futuro cercano, con la implementación de una 3era pista en el principal terminal aéreo del país.

En este informe se entregan resultados de la capacidad operacional que tiene el aeropuerto SCEL mediante el uso del software Simmod Pro!, teniendo en consideración diversos supuestos presentados en el documento. Para determinar la capacidad que tenía SCEL en el momento de la elaboración del documento, se utilizó el mismo tipo de información oficial que se describe en el capítulo **1.3 Metodología**, además de añadir un par de mejoras en la infraestructura horizontal del terminal en esa época.

Este documento entrega como resultado que el aeropuerto SCEL es capaz de admitir un máximo de **84 operaciones por hora** considerando una configuración de pistas paralelas simultaneas e independientes.

Estas grandes diferencias entre los resultados declarados por la DGAC y los resultados obtenidos gracias a Simmod Pro! se pueden explicar debido a la diferencia entre las metodologías utilizadas, siendo la modelación de SCEL un método que considera una mayor cantidad de variables a diferencia de la metodología utilizada por DGAC que tiene el foco puesto en la capacidad de control ATC.

Debido a esta discrepancia en la capacidad operacional de SCEL es de vital importancia poder realizar más estudios con una metodología de simulación con el fin de validar los resultados presentados en la actualización del plan maestro de SCEL.

2.2.4. Estudios previos con softwares de simulación.

Como se mencionó anteriormente en esta memoria, los softwares de simulación son la herramienta más completa que existe para poder determinar la capacidad operacional de un aeropuerto gracias a su dinamismo, gran cantidad de variables disponibles y su rapidez para poder entregar resultados de meses de operaciones simuladas en minutos.

Es por este motivo que estos softwares son herramientas de uso común entre aerolíneas, entidades gubernamentales y coordinadores de aeropuertos de todo el mundo, con el fin de aumentar, optimizar o evaluar distintas iniciativas que tienen como objetivo alargar la vida útil de un aeropuerto.

Debido al tipo de información utilizada y que en su mayoría son estudios internos de las compañías que los utilizan, no es simple encontrar estudios realizados con estas herramientas de simulación y que además contengan todo el desarrollo documentado; generalmente solo se menciona su uso, variables utilizadas y los resultados obtenidos.

Dentro de los estudios publicados que fueron realizados con un software de simulación se encuentran los siguientes:

Airport Capacity, FAA²⁷:

En este documento oficial de la FAA se detallan los perfiles de capacidad aeroportuaria de los principales terminales aéreos del país. Para el cálculo de dichas capacidades se utilizó el software *RunwaySimulator* que solo es capaz de simular las pistas de aterrizaje de un aeropuerto. Una vez realizada la investigación previa y determinada la configuración de las pistas a evaluar, se creó y documentó una tabla con los resultados obtenidos.

²⁷ Capacidades declaradas para los principales aeropuertos de EE. UU. (Airport Capacity Profiles, 2014)

Airport Identifier and Name		Aircraft Operations (Arrivals and Departures) per Hour		
		Visual	Marginal	Instrument
ATL	Hartsfield-Jackson Atlanta International	216-226 (AP)	201-208	175-190 (AP)
		219-222 (DP)	(AP)	183-186 (DP)
			206 (DP)	168-169 (LIMC - AP) 168-179 (LIMC - DP)
BOS	Boston Logan International	116-125	109-112	84-86
DEN	Denver International	262-266 (AP)	224-279	224-243
		266-298 (DP)		
DFW	Dallas/Fort Worth International	226-264	194-245	170
EWR	Newark Liberty International	94-99 (AP)	76-84	68-70
		94-100 (DP)		
IAH	Houston George Bush Intercontinental	172-199	152-180	144-151
JFK	New York John F. Kennedy International	84-87 (AP)	85-86	74-84
		90-93 (DP)		
LAX	Los Angeles International	167-176	147-153	133-143
MIA	Miami International	132-150	132-148	100-104
ORD	Chicago O'Hare International	214-225	194-200	168-178
SFO	San Francisco International	100-110	90-93	70-72
AP = Arrival Priority Configuration		DP = Departure Priority Configuration		LIMC = Low Instrument

Tabla 2.2 Capacidad operacional actual para algunos de los principales aeropuertos en EE. UU.

Nota: Adaptada de (Table 1. Capacity Rate Ranges for Current Operations at the Core Airports, 2014, pág. 9)

En este mismo documento también se describen los aumentos en la capacidad operacional esperados para cada uno de estos aeropuertos y cuáles son las mejoras futuras que permitirán dichos aumentos en la capacidad.

Plan maestro Aeropuerto Oakland (KOAK/OAK)²⁸:

Otro estudio operacional realizados con un software de simulación, es el desarrollo del plan maestro del aeropuerto internacional de Oakland, California, EE. UU. de 2006, donde se evaluaban diferentes propuestas que tenían como objetivo mejorar la capacidad operacional del aeropuerto utilizando Simmod Pro!.

El análisis se dividió en 3 escenarios que presentaban alguna modificación a la estructura horizontal del aeropuerto. El primer escenario incluyó una mejora en el acceso a la RWY 29, el segundo escenario consideraba la construcción de una nueva calle de rodaje de salida rápida y el tercer escenario consideraba ambas mejoras al mismo tiempo.

²⁸ (SIMMOD Simulation Airfield and Airspace Simulation Report Oakland International Airport Master Plan Preparation Report, 2006)

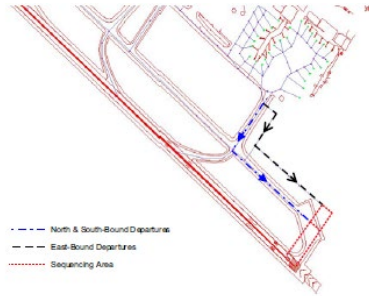


Imagen 2.12 (Figure 8: Proposed Runway 29 Access Improvement at Oakland International Airport, 2006, pág. 18)

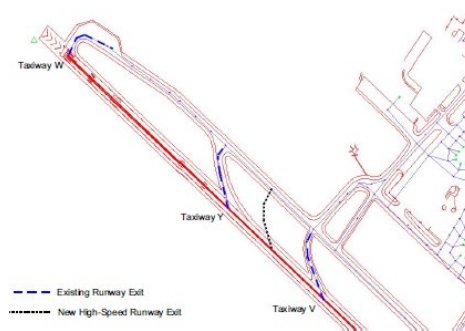


Imagen 2.13 (Figure 9: Proposed High-Speed Runway Exit at Oakland International Airport, 2006, pág. 19)

Los resultados presentados muestran una disminución en los tiempos de atraso en todos los escenarios analizados siendo el escenario 3, donde se combinan ambas mejoras, el que mayor disminución presento en los tiempos de atraso.

	Cantidad de vuelos	Atrasos en punto de espera RWY 29	% de mejora en los tiempos de atrasos en punto de espera RWY 29
Escenario base	96	15.8	-
Escenario 1	96	9.6	23%
Escenario 2	96	12	21%
Escenario 3	96	8	36%

Tabla 2.3 Resultados presentados de la simulación del aeropuerto KOAK.

Primera fase de construcción nuevo aeropuerto de Estambul (LTFM/IST)²⁹:

Publicado el año 2019 este estudio buscaba determinar la capacidad operacional para la primera fase de construcción del aeropuerto, que consideraba el terminal principal de pasajeros más 2 pistas paralelas dependientes. Para el desarrollo de este proyecto se utilizó Simmod Pro! como software de simulación.

²⁹ (Air Traffic Flow Impact Analysis of RECAT for Istanbul New Airport using Discrete-Event Simulation, 2019)

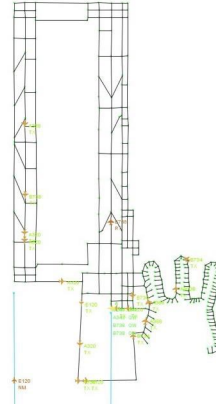


Imagen 2.14 (Figure 4. The simulation model of Istanbul New Airport Phase 1-a in SIMMOD., 2019, pág. 439)

Los resultados son presentados en este documento dando como resultado que la capacidad operacional para las 2 pistas dependientes simuladas es de 75 operaciones por hora.

Mejoras operaciones De-icing Aeropuerto de Denver (KDEN/DEN)³⁰:

Por el año 2011 se utilizó el software Simmod Pro! para crear procedimientos que mejoraran las operaciones de de-icing en el aeropuerto en temporadas de intensas nevadas. Los resultados obtenidos revelaron que se podían ahorrar en promedio 2.6 minutos por despegue, lo que equivalía, en ese momento, a aproximadamente \$88 millones de USD considerando un coste por minuto de \$41.27 USD.

Estudio de capacidad operacional Aeropuerto de Seúl (RKSI/ICN)³¹:

Para finalizar con los ejemplos de estudios realizados con softwares de simulación se presenta el estudio realizado en el año 2019 en el cual se calculó, mediante el uso de Simmod Pro!, la capacidad operacional del aeropuerto internacional de Incheon (RKSI/ICN) ubicado en la capital de Corea del Sur, Seúl.

En este estudio se calculó en primera instancia la capacidad operacional del aeropuerto cuando solo contaba con 3 pistas (33L/R, 34), para luego poder determinar la fecha en la cual se alcanzaría la saturación de estas 3 pistas y fuese necesario la entrada en vigor de una cuarta; y en segundo lugar se calculó la capacidad de estas 3 pistas al modificar las calles de rodaje de salida rápida. Los resultados para el primer punto de análisis mostraron que el aeropuerto internacional de Seúl tenía una capacidad de 83 operaciones por hora y un total de 466.128

³⁰ (21 Century, fast-time airport and airspace modeling: Analysis with Simmod, 2011)

³¹ (Estimation of Incheon International Airport capacity by using aircraft delay simulation model, 2019)

operaciones por año y que de acuerdo con la proyección de demanda de esa época se alcanzaría la saturación de las 3 pistas por el año 2023.

Los resultados para el segundo punto analizado mostraron una mejoría en la capacidad de +3 operaciones por hora y de 16.848 operaciones por año, alcanzando las 482.976 operaciones por año, pero de todas maneras alcanzando la saturación en el año 2023. En la actualidad, el aeropuerto internacional Incheon cuenta con 4 pistas operativas reflejando que los resultados de este análisis si se tradujeron en medidas mitigatorias por parte de la autoridad correspondiente.

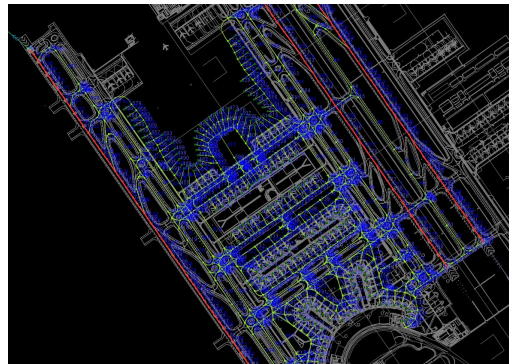


Imagen 2.15 (Fig 2. Modeling Incheon international airport, 2019, pág. 22)

Todos estos estudios presentados demuestran que el uso de software de simulación para determinar la capacidad operacional de un aeropuerto puede ser utilizados para diversos escenarios y configuraciones, entregando resultados más precisos y exactos que aquellos modelos más básicos y estrictos que no permiten la variabilidad y capacidad de modificación que te entrega una herramienta como Simmod Pro!. Es importante destacar que, en más de un escenario presentado, los resultados obtenidos implicaron mejoras en el funcionamiento y/o sirvieron como estudio preventivo para promover mejoras en los aeropuertos estudiados.

2.3. Propuesta metodológica

De acuerdo con lo descrito a lo largo del **Capítulo 2** y con el fin de realizar un desarrollo robusto y completo, es necesario revisar una extensa cantidad de documentación que considera a la normativa nacional e internacional, la obtención de información oficial aeronáutica y la obtención de los valores promedio reales sobre las variables a utilizar en Simmod Pro!, para luego poder modelar y simular el escenario actual de SCEL y todas aquellas modificaciones que son parte de los objetivos secundarios de esta memoria.

Para lograr responder al **Objetivo general** y a los **Objetivos secundarios** propuestos en esta memoria se seguirá la metodología descrita a continuación, que se obtiene su estructura en base a la literatura y documentación presentada a lo largo de este capítulo. Esta metodología se divide en 4 procesos principales los cuales son:

2.3.1. Recopilación de información aeronáutica oficial.

Este es el primer proceso que se debe realizar en el desarrollo de esta memoria ya que establece las bases del escenario con el cual se estará trabajando. Se debe considerar toda la información aeronáutica relacionada a procedimientos estandarizados de salidas (SID), llegadas (STAR) y aproximación (IAC) como lo son restricciones de velocidad, separaciones horizontales o patrones de espera. Se debe considerar también toda aquella información disponible sobre las distancias declaradas y la configuración de uso de las pistas de aterrizaje, ubicación y estructura de las calles de rodaje, puertas de embarque, etc.

Para esta etapa de la metodología propuesta las fuentes de información principales se encuentran en el capítulo I y II del AIP^{32 33}

Para la obtención de toda la información respecto a la ubicación y diseño de las calles de rodaje se utiliza la herramienta geográfica QGIS³⁴ que permite, mediante imágenes satelitales, determinar donde se encuentran ubicadas las calles de rodaje y sus respectivas intersecciones entre ellas y con la pista.

2.3.2. Análisis cumplimiento normativo nacional e internacional.

Una vez recopilada toda la información oficial publicada por DGAC, se debe revisar toda la normativa nacional e internacional que regula aquellos aspectos que se simularán en esta

³² (AIP-Chile Vol. I: AD 2 SCEL – Aeródromo Arturo Merino Benítez (AMDT 63), 2025)

³³ (AIP-Chile VOL II AMDT N° 99, 2025)

³⁴ (QGIS, 2025)

memoria y toda la regulación que afecta a aquellos parámetros que serán modificados con el fin de optimizar y mejorar la capacidad operacional de SCEL, siempre y cuando estas modificaciones cumplan con toda la normativa que los regula.

Para obtener la información regulatoria sobre temas como diseño de aeropuertos, operaciones aéreas, limitaciones legales sobre velocidades en aproximación o en pista, capacidad de operar las pistas de manera simultánea e independiente y separaciones horizontales, se debe consultar la normativa chilena disponible en la página oficial de la DGAC ya sea como norma aeronáutica (DAN), circulares aeronáuticas, procedimientos (DAP) o reglamentos aeronáuticos (DAR) y para la norma internacional se debe consultar en documentos redactados y publicado por la OACI o FAA que sirven como inspiración para la normativa chilena.

2.3.3. Recopilación de variables operacionales.

Esta etapa es una de las más influyentes en los resultados que se obtendrán de la simulación realizada ya que ayudan a definir y modelar el funcionamiento y dinámica que existe en las operaciones realizadas en el aeropuerto SCEL. En esta sección se utilizará una herramienta de Airbus llamada Skywise que permite obtener valiosa información de los sensores de las aeronaves en distintas etapas y ubicaciones del vuelo tales como:

- Velocidad en aproximación, aterrizaje y despegues.
- Velocidad de rodaje en pista y calles de rodaje.
- Tiempos de aproximación.
- Tiempos de ocupación de pista.

Y además se utilizará información compartida por DGAC respecto a las bitácoras de vuelos realizados en 2022, 2023, y 2024 de las cuales se obtiene información como:

- Cantidad de operaciones en hora punta.
- Cantidad de operaciones por tipo de aeronave.
- Cantidad y tipo de operación por pista.
- Distribución entre aterrizajes y despegues.
- Orígenes y destinos más frecuentes.

Una vez recopilada toda esta información se debe ingresar al software en forma de variables para luego poder realizar la simulación y obtener la capacidad que tiene el aeropuerto SCEL bajo condiciones actuales.

Para poder entender que variables presentan una mayor capacidad de mejora en función de su impacto en la capacidad operacional, se deben comparar los valores recopilados para cada variable y ver que tan alejados se encuentran de su óptimo de acuerdo con lo que permite la normativa anteriormente revisada. Una vez identificadas dichas variables, serán modificadas con el fin de mejorar el escenario y resultados actuales.

2.3.4. Modelamiento de SCEL en Simmod Pro!

Esta es la etapa que mayor tiempo, conocimiento y concentración requiere en todo el desarrollo de esta metodología, ya que es en la cual se crea el escenario a simular.

Como la capacitación oficial realizada por el proveedor no era una alternativa viable por su alto costo, esta sección se realiza en base a el instructivo básico entregado por ATAC al momento de descargar Simmod Pro! además de la observación detallada de los escenarios disponibles en el software que funcionan como guía para el desarrollo de la simulación.

El objetivo principal de esta etapa es poder ingresar todas las variables que se consideren necesarias para poder representar de la mejor manera el funcionamiento y organización que tiene el aeropuerto SCEL, además de todas aquellas que el software necesita de manera obligatoria para poder funcionar y crear los reportes con los resultados de dicha simulación.

2.3.5. Análisis y presentación de los resultados.

Una vez realizada la simulación, el software permite visualizar en tiempo real el flujo creado para la simulación y como se organiza en el aeropuerto y TMA en función de las variables y condiciones dadas por el analista.

Además de esta gran herramienta de visualización, se pueden generar una gran cantidad de reportes que entregan información importante sobre distintos parámetros y resultados obtenidos de la simulación tales como:

- Flujo de aeronaves en waypoint a elección.
- Flujo de aeronaves por cada pista.
- Tiempos de ocupación de pista, aproximación y despegue.
- Retrasos promedio para aterrizajes y despegues.
- Zonas de cuello de botella en el flujo del espacio aéreo o lado aire del aeropuerto.
- Cantidad de operaciones realizadas.



Gracias a estos reportes es que se puede determinar la capacidad operacional de SCEL e identificar donde se generan las demoras o cuellos de botella en el flujo de las aeronaves.

En los reportes de la simulación se describe la cantidad de operaciones realizadas por hora, la demora promedio por vuelo y la cantidad de vuelos que tuvieron demoras por sobre los 5, 10 y 15 minutos, lo que permite determinar la cantidad de operaciones por hora que se pueden realizar en un aeropuerto antes de que las demoras aumenten exponencialmente y se supere el límite de minutos promedio de retraso permitido, que en esta memoria es de +10 minutos. Gracias a todos los procesos anteriormente mencionados es que se pueden cumplir y responder todos los objetivos presentados en esta memoria velando siempre que los resultados entregados cumplan con representar de manera fidedigna la realidad que tiene hoy en aeropuerto SCEL, gracias a los valores obtenidos mediante la herramienta de Airbus, Skywise que reflejan la realidad de las operaciones teniendo siempre como pilar fundamental el cumplimiento de la normativa que regula la industria aeronáutica.

3. Capítulo 3: Desarrollo

En esta sección se resume todo el desarrollo realizado a lo largo de la memoria. Como se describió en el capítulo de **Propuesta metodológica**, el desarrollo se divide en 4 partes que serán explicadas a continuación en orden secuencial de desarrollo.

3.1. Recopilación de información aeronáutica oficial.

Para la construcción y modelación del espacio aéreo y lado aire del aeropuerto SCEL, se deben consultar las fuentes oficiales³⁵ para poder obtener la información correspondiente a:

- INFO RWY (Umbrales, heading y distancias declaradas).
- Procedimientos estandarizados de aproximación (STAR), aterrizaje (IAC) y despegues (SID).
- Waypoints (Coordenadas, altitud y velocidades).
- TWY (Ubicación, intersecciones de pista y ángulos de salida)
- Puertas de embarque (Coordenadas).

Al revisar la página oficial de AIP CHILE se pueden encontrar todos los procedimientos publicados por aeropuerto, divididos en 4 categorías principalmente:

- STAR (Standard Terminal Arrival Route): Procedimiento de llegada diseñado para guiar a una aeronave desde el final de la fase crucero hasta las cercanías de un aeropuerto, facilitando su transición hacia la aproximación final.
- IAC (Instrumental Approach Chart): Carta aeronáutica que proporciona toda la información necesaria para que un piloto realice una aproximación y aterrizaje utilizando instrumentos.
- SID (Standard Instrument Departure): Procedimiento de salida diseñado para guiar a una aeronave desde el despegue hasta que se una con una aerovía, usando navegación por instrumentos.
- INFO RWY: Cartilla con todos los datos técnicos y operativos de una pista de aterrizaje o despegue), esenciales para la planificación y ejecución de un vuelo seguro.

Partiendo con la información respectiva a las pistas de aterrizaje/despegue, el aeropuerto Internacional Arturo Merino Benítez (SCEL/SCL) cuenta con 2 pistas paralelas con

³⁵ (AIP-Chile VOL II AMDT N° 99, 2025)

orientación de 177° grados respecto al norte magnéticos para RWY17L y RWY17R, y de 357° grados respecto al norte magnéticos para RWY 35L y RWY35R.

Las distancias declaradas para cada pista son las siguientes:

RWY	TORA (m)	TODA (m)	ASDA (m)	LDA (m)	ANCHO (m)
17L	3750	3750	3750	3750	55
35R	3750	3750	3750	3200	55
17R	3800	3800	3800	3800	45
35L	3800	3800	3800	3800	45

Tabla 3.1 Distancias declaradas para las RWY de SCEL.

Ambas pistas son Clave de Referencia OACI 4E y de acuerdo con el tráfico predominante las pistas en uso son RWY 17L y RWY 17R, con modalidad preferente de operaciones segregadas, siendo la RWY 17L para llegadas y la RWY 17R para despegues con la posibilidad de realizar operaciones simultaneas cuando las cartillas de aproximación lo indiquen.

Cada una de las pistas posee 2 calles de rodaje de salida rápida cuando se aproxima desde el norte, que tienen como objetivo acelerar el desalojo de la pista y reducir los tiempos de ocupación. En el caso de la RWY17L las calles de rodaje son TWY C y TWY B y para la RWY17R las calles de rodaje son TWY U y TWY W.

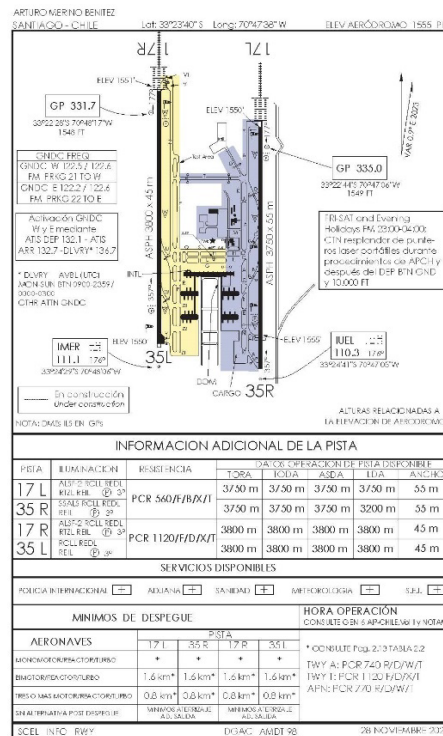


Imagen 3.1 (AIP-Chile VOL II AMDT N° 99, 2025, pág. 696)

Una vez obtenida la información sobre las pistas de SCEL se continua con la recolección de información respecto a todos los procedimientos publicados para las pistas de SCEL, dándole importancia a aquellos procedimientos disponibles para la RWY 17L y RWY 17R ya que son las pistas por la que se realizan el 98% de las operaciones.

En el caso del aeropuerto SCEL, existen:

- 11 STAR, de las cuales, 8 son para las pistas 17R y 17L con 4 procedimientos teniendo requisitos de navegación RNAV y los 4 restantes diseñados para aproximaciones mediante VOR.
- 18 IAC divididas en 7 procedimientos para la RWY 17L, 7 procedimientos para la RWY 17R Y los 4 restantes para las pistas 35L y 35R. De los 14 procedimientos publicados para las RWY 17L y RWY17R, 6 son procedimientos ILS, 3 son RNP, 3 son RNP (AR) y los 2 restantes son procedimientos VOR.
- 13 SID, de las cuales, 6 son exclusivas para RWY 17L y RWY17R, 6 son para todas las pistas de aterrizaje y solo una está diseñada exclusivamente para las pistas 35L y 35R. 9 de los 12 procedimientos disponibles para las pistas 17L y 17R tienen como requisito el uso de navegación RNAV 1 o RNP 1.

Cada uno de estos procedimientos cuenta con una cartilla grafica con la información más importante del procedimiento además de una tabla complementaria donde se encuentra la información respecto a los waypoint utilizados en el procedimiento. En esta tabla se encuentra información como nombre, path term, heading, distancia en NM desde el waypoint anterior, altitud y restricción de velocidades si existe.

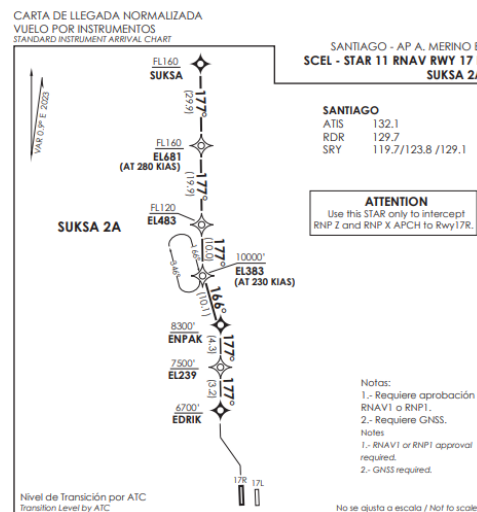


Imagen 3.2 Adaptado de: (SCEL - STAR 11 RNAV RWY 17R SUKSA 2A, 2025, pág. 681)

PROCEDIMIENTOS DE LLEGADA RNAV / RNAV ARRIVAL PROCEDURES (Esta información complementa a las cartillas publicadas en la AIP Chile VOL II / This information complements the charts published in the AIP Chile VOL II)									
STAR 11 RWY 17R SUKSA 2A									
NR SERIE	PATH TERM	PUNTO DE RECORRIDO (WPT)	FO	COURSE/TRACK °M/T	DIST (NM)	TURN	ALTITUD	REST VELOCIDAD	NAV
10	IF	SUKSA	-	-	-	-	FL160+	-	RNAV 1 ó RNP 1
20	TF	EL681	-	177° (178,22)	29,89	-	FL160+	@280 KIAS	
30	TF	EL483	-	177° (178,21)	19,89	-	FL120+	-	
40	TF	EL383	-	177° (178,20)	10	-	10000 FT+	@230 KIAS	
50	TF	ENPAK	-	166° (167,27)	10,1	-	8300 FT+	-	
60	TF	EL239	-	177° (177,51)	4,3	-	7500 FT+	-	
70	TF	EDRIK	-	177° (177,51)	3,2	-	6700 FT+	-	

Imagen 3.3 Tabla complementaria a cartilla STAR 11, SCEL.

Para la obtención de esta tabla y las respectivas coordenadas de los waypoint involucrados en cada procedimiento se debe consultar el volumen II del AIP³⁶ donde se encuentra toda la información respecto al aeropuerto SCEL.

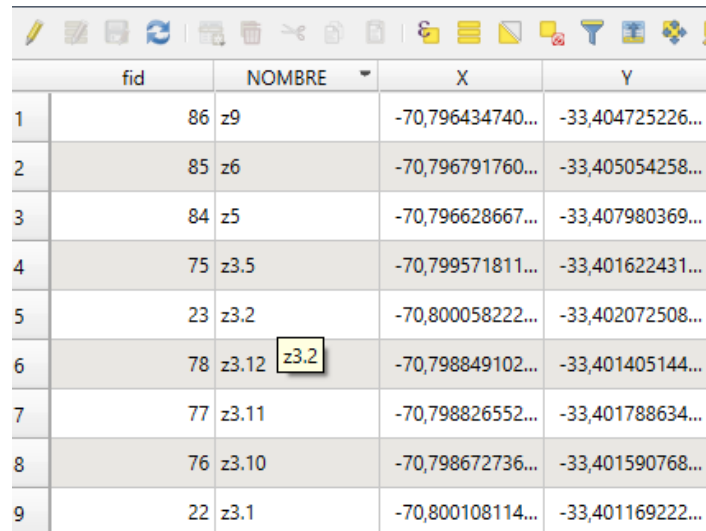
Pasando a los puntos en tierra, para obtener la ubicación e intersecciones de las calles de rodaje se utiliza la herramienta geográfica QGIS que permite identificar estas intersecciones y obtener las coordenadas geográficas de un punto gracias al uso de imágenes satelitales.



Imagen 3.4 Ubicación de las intersecciones obtenidas con la herramienta QGIS.

³⁶ (AIP-Chile VOL II AMDT N° 99, 2025)

Gracias a esta herramienta se obtuvo la ubicación de todas las intersecciones relevantes para el análisis. Se crean un total de 452 puntos de interés y gracias a la herramienta “Calculadora de campos”, disponible en QGIS, se obtienen sus respectivas coordenadas que luego deben ser ingresadas a Simmod Pro!.



	fid	NOMBRE	X	Y
1	86	z9	-70,796434740...	-33,404725226...
2	85	z6	-70,796791760...	-33,405054258...
3	84	z5	-70,796628667...	-33,407980369...
4	75	z3.5	-70,799571811...	-33,401622431...
5	23	z3.2	-70,800058222...	-33,402072508...
6	78	z3.12 z3.2	-70,798849102...	-33,401405144...
7	77	z3.11	-70,798826552...	-33,401788634...
8	76	z3.10	-70,798672736...	-33,401590768...
9	22	z3.1	-70,800108114...	-33,401169222...

Imagen 3.5 Tabla con las coordenadas obtenidas gracias a QGIS.

Luego de obtener la ubicación y coordenadas de las intersecciones entre las calles de rodaje se continuo con la obtención de las coordenadas correspondientes a las puertas de embarque que tiene el aeropuerto SCEL. Estas coordenadas se obtienen del documento (AIP-Chile Vol. I: AD 2 SCEL – Aeródromo Arturo Merino Benítez (AMDT 63), 2025) en donde se encuentra la información respecto a las 118 puertas de embarque existentes hoy en día en SCEL.

Una vez obtenida la información respecto a las puertas de embarque se debe continuar con el chequeo de normativa y entender cuáles son las limitaciones que tiene cada estructura del aeropuerto y el TMA.

3.2. Análisis cumplimiento normativa nacional e internacional.

Una vez recopilada la información respecto a la cantidad y ubicación de las pistas, sus calles de rodaje y los respectivos procedimientos de llegada y salida, se debe determinar si el aeropuerto SCEL tiene la capacidad de operar con sus 2 pistas paralelas de manera independiente para aproximaciones y salidas. Para poder realizar un análisis completo respecto al cumplimiento de la normativa, se deben tener en consideración todos los requisitos normativos relacionados a la infraestructura terrestre del aeropuerto y a los modos de operación en pistas paralelas. La revisión de esta normativa tiene como objetivo establecer si el aeropuerto SCEL cumple con los requisitos operacionales para poder operar en sus dos pistas actuales de manera simultánea e independiente tanto en despegues como en aterrizajes.

3.2.1. Normativa infraestructura terrestre.

Para comenzar con el análisis de la normativa se considera toda la infraestructura horizontal del aeropuerto como lo son las pistas de despegue/aterrizaje y sus respectivas calles de rodaje de salida rápida.

Partiendo por las pistas; de acuerdo con la normativa vigente³⁷, la separación entre pistas paralelas debe ser superior a 210 [M] cuando se opera en condiciones VMC y superior a 1.035 [M] cuando se opera en condiciones IFR.

Gracias a la herramienta QGIS y a las coordenadas de los umbrales de pista obtenidas en el documento (AIP-Chile Vol. II: Tabla de coordenadas – SCEL (Amend. 99), 2025), se determina que la distancia que separa ambas pistas de aterrizaje es de **1.561 [M]**, superior a la separación exigida por la norma para operaciones en condiciones VFR e IFR, por lo que el aeropuerto SCEL cumple con las condiciones, respecto a la separación entre pistas, para permitir operaciones simultaneas independientes.

³⁷ (DAN 14 154: Normas de diseño y operación para aeródromos, 2017)



Imagen 3.6 Distancia ente RWY 17L y RWY 17R obtenida mediante el uso de herramienta QGIS.

Una vez establecido que la separación entre pistas cumple con la normativa exigida respecto a operaciones simultáneas e independientes, se continua con la evaluación de las calles de rodaje de salida rápida y los requisitos que existen en la normativa chilena al respecto.

Para determinar la velocidad máxima permitida al transitar por una calle de rodaje de salida rápida se tiene que considerar que el ángulo de intersección de la calle de rodaje con la pista sea mayor a 25° y menor a 45° , y que el radio de la curva de viraje sea de 275 [M] si se considera una calle de rodaje clave 1 o 2 y de 550 [M] si la clave es 3 o 4³⁸.

Se utiliza la herramienta QGIS para evaluar ambos requisitos y se obtienen los siguientes resultados:

- Angulo de intersección es aproximadamente 30° , que de acuerdo con lo descrito en la DAN 14 154³⁹, es el valor recomendado cuando se diseña una calle de salida rápida.

³⁸ (DAN 14 154: Normas de diseño y operación para aeródromos, 2017, págs. 104-105)

³⁹ (DAN 14 154: Normas de diseño y operación para aeródromos, 2017, págs. 104-105)

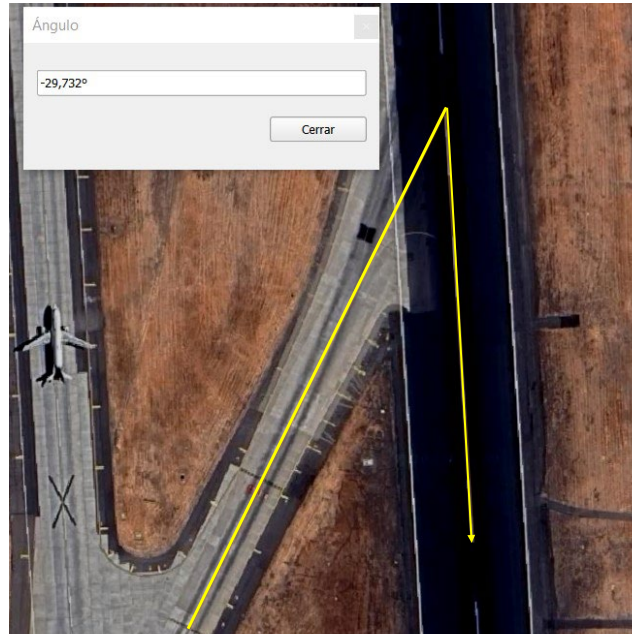


Imagen 3.7 Ángulo de intersección entre TWY C y RWY 17L.

- Radio de la curva de viraje es de 550 [M], por lo que se cumplen con los requisitos para ser clave es 3 o 4.



Imagen 3.8 longitud del radio de curva de viraje para TWY C.

Una vez calculado el ángulo de intersección entre calle de rodaje y pista y la longitud del radio de viraje, se puede establecer que, de acuerdo con la norma, la velocidad de rodaje máxima permitida en una calle de salida rápida es de **93 [km/h]** en condiciones de pista mojada.

Estos criterios aplican de igual manera para las calles de roda de salida rápida TWY B, TWY U y TWY W, por lo que el aeropuerto cuenta con 4 TWY que permiten un rápido desalajo de las pistas de aterrizaje.

3.2.2. Normativa espacio aéreo y modos de operación.

Una vez analizada la normativa respectiva a las pistas y calles de rodaje del aeropuerto, se continua con el análisis de la normativa que regula los modos de operación, teniendo en consideración visibilidad y separaciones entre aeronaves despegando o aproximando.

Antes de establecer si el aeropuerto es capaz de albergar operaciones de manera simultánea e independiente, se debe establecer en qué condiciones se va a determinar la capacidad operacional, ya sea en condiciones VFR o en condiciones que ameriten operaciones instrumentales (IFR). Es importante señalar que, por normativa, existen menores restricciones a la operación cuando se realizan en condiciones visuales (VFR) en comparación a aquellas operaciones que, por falta de visibilidad e incapacidad de visualizar flujo cercano, se deben realizar de manera instrumental.

Para establecer en qué condiciones se determinará la capacidad operacional de SCEL, se debe revisar la data histórica e identificar qué porcentaje del año se opera bajo condiciones VFR y que porcentaje se hace bajo condiciones IFR. Para obtener estos resultados se utiliza un recopilado histórico de METAR y se seleccionan los requisitos mínimos de visibilidad y techo de nubes exigidos para poder operar en condiciones VFR.

De acuerdo con lo establecido en la norma nacional⁴⁰, los requisitos de visibilidad horizontal y techo de nubes, para poder realizar operaciones visuales en aeródromos controlados, son los siguientes:

- Al menos 1500 [FT] de visibilidad vertical.
- Al menos 5 [KM] de visibilidad horizontal en tierra.

Una vez establecidos los mínimos de visibilidad requeridos para realizar operaciones VFR, se analizan un total de 109.120 METAR, desde el 2013 en adelante, obteniendo los siguientes resultados:

⁴⁰ (DAN 91 - Reglas del Aire, 2023, pág. 47)

MES	CANTIDAD METAR	CANTIDAD DE METAR BAJO MINIMOS	% OPERACIONES IFR
1	9616	185	1.92%
2	8749	253	2.89%
3	9660	370	3.83%
4	9317	791	8.49%
5	9594	1629	16.98%
6	9363	2227	23.79%
7	9178	2270	24.73%
8	8883	1580	17.79%
9	8617	813	9.43%
10	8881	491	5.53%
11	8517	310	3.64%
12	8745	262	3.00%
TOTAL	109120	11181	10.25%

Tabla 3.2 Cantidad de METAR analizados y % bajo mínimos (5 [Km] y 1500' [Ft]) SCEL.

Estos resultados evidencian que el aeropuerto SCEL opera, en promedio, el 89% del tiempo en condiciones VFR, disminuyendo a un 75% al considerar el mes más complejo.

Un punto para tener en consideración es que en el aeropuerto SCEL, cuando se desean realizar aproximaciones paralelas, los requisitos de visibilidad aumentan respecto a los exigidos para operar en condiciones VFR, llegando a los siguientes valores:

- 5 [Km] de visibilidad horizontal y 5000' [Ft] de visibilidad vertical.

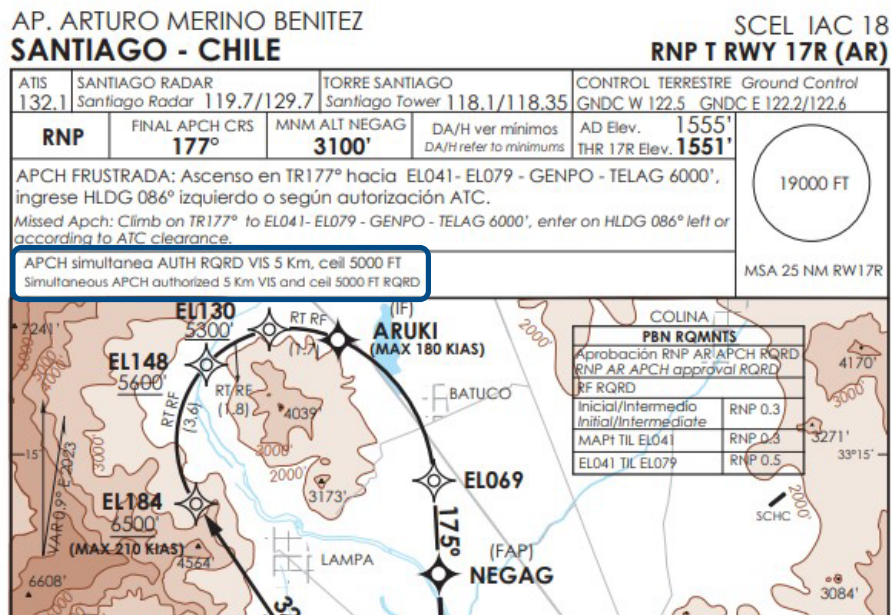


Imagen 3.9 Requisitos de visibilidad para poder operar aproximaciones simultaneas SCEL.

Al igual que en el escenario de condiciones VFR, se debe evaluar el porcentaje de horas que se encuentran por debajo de estos mínimos operacionales que limitarían la posibilidad de realizar aproximaciones simultaneas independientes. Al evaluar el mismo periodo que el escenario anterior, se obtienen los siguientes resultados:

MES	CANTIDAD METAR	CANTIDAD DE METAR BAJO MINIMOS	% OPERACIONES IFR
1	9616	431	4.48%
2	8749	447	5.11%
3	9660	571	5.91%
4	9317	1394	14.96%
5	9594	2347	24.46%
6	9363	3094	33.04%
7	9178	3234	35.24%
8	8883	2916	32.83%
9	8617	2315	26.87%
10	8881	1590	17.90%
11	8517	959	11.26%
12	8745	586	6.70%
TOTAL	109120	19884	18.22%

Tabla 3.3 Cantidad de METAR analizados y % bajo mínimos (5 [Km] y 5000' [Ft]) SCEL.

Respecto a los resultados obtenidos para condiciones VFR, existe una disminución promedio del 8% en la disponibilidad del aeropuerto al evaluar las condiciones de visibilidad requeridas para realizar aproximaciones simultaneas, pero de todas maneras el aeropuerto se encuentra disponible sobre el 80% del tiempo para recibir aproximaciones paralelas, disminuyendo a un 65% en el mes más complicado.

En base a los resultados presentados, se establece que la capacidad operacional será considerando operaciones bajo condiciones de vuelo VFR permitiendo aproximaciones simultaneas independientes ya que el aeropuerto se encuentra por sobre los requisitos de visibilidad, de ambos casos, el 80% del tiempo.

Una vez establecido en qué condiciones se simulan las operaciones en esta memoria, se continua con el análisis y chequeo de la normativa que se debe cumplir con el fin de poder realizar operaciones simultaneas en condiciones IFR ($\approx 10\%$ de las operaciones).

Respecto a la normativa correspondiente a los modos de operación, se debe analizar si los procedimientos de aproximación y salida del aeropuerto SCEL cumplen con los requisitos establecidos en la norma para operaciones en condiciones IFR.

Para esta parte del análisis normativo es necesario segmentar la norma existente en aproximaciones simultaneas independientes y despegues simultáneos independientes.

Se comienza el análisis con las aproximaciones simultaneas independientes, revisando la normativa y requisitos que se deben cumplir para poder evolucionar de operaciones en condiciones visuales como se hace en la actualidad a operaciones en condiciones IFR.

Aproximaciones simultaneas:

Respecto a las aproximaciones, dentro de la norma existen requisitos relacionados con el espacio aéreo y los modos de operación utilizados, además de establecer condiciones mínimas que se deben dar respecto al control ATC en la fase final de aproximación. Debido a la naturaleza del tema tratado en esta memoria, el enfoque se encuentra en toda la normativa relacionada al espacio aéreo y los modos de operación, por lo que solo se ahonda en esta parte de la norma y no en los requisitos de control ATC, los cuales solo serán mencionados en este análisis ya que, independientemente del objetivo de esta memoria, deben ser aplicados para cumplir con la norma y poder realizar aproximaciones simultaneas en condiciones IFR. Respecto al espacio aéreo, se comienza con la normativa relacionada a la separación que debe existir entre las derrotas al operar aproximaciones paralelas y la respectiva divergencia que debe existir entre sus frustradas.

Respecto a la separación entre la trayectoria de 2 aproximaciones paralelas, la norma⁴¹ establece que se debe cumplir con una separación mínima entre las derrotas, la cual se conforma por 2 zonas de protección, que son las siguientes:

- NOZ: Zona de protección que se extiende, desde la trayectoria establecida por el procedimiento de aproximación, hacia cada lado cubriendo la distancia correspondiente a la especificación de navegación utilizada en el procedimiento.
- NTZ: Zona corredor existente entre 2 trayectorias de aproximación paralelas y sus respectivas NOZ. Esta zona tiene un ancho mínimo de 610 [M] y se extiende desde el umbral más cercano hasta el punto donde la separación vertical (1.000 [Ft]) y/o la separación horizontal (3 [NM]) no son proporcionadas.

⁴¹ (Doc 9643, Manual on Simultaneous Operations on Parallel or Near-Parallel Instrument, 2020)

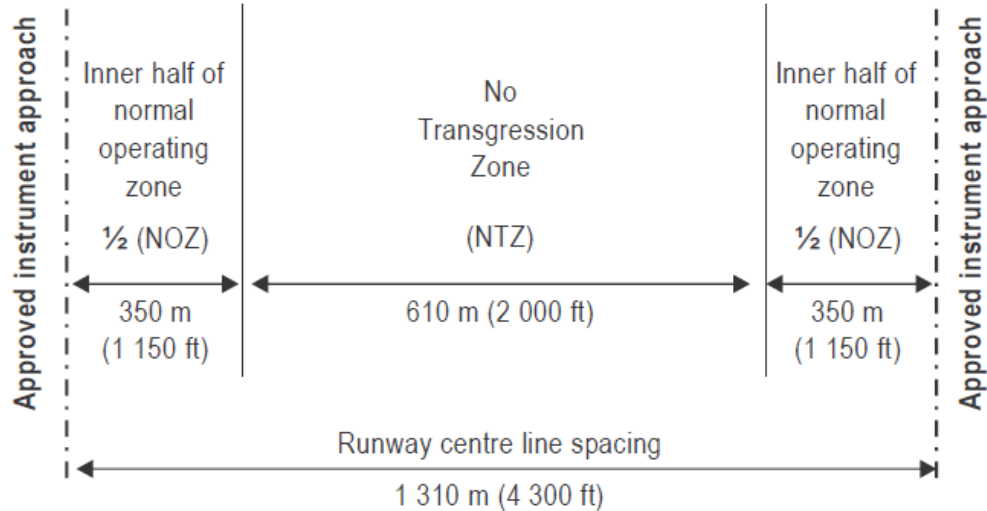


Imagen 3.10 (Figure 2-3. NOZ and NTZ example for one runway centre line spacing, 2020, pág. 27)

Se determina, gracias a la herramienta QGIS, la separación existente entre las trayectorias a ambas pistas de SCEL para evaluar si se cumple con las distancias establecidas para cada zona existente en la norma.



Imagen 3.11 Distancias obtenidas entre las trayectorias de aproximación SCEL.

Como se observa en la **Imagen 3.11**, las distancias mínimas requeridas para la NTZ y NOZ se cumplen al considerar aproximaciones con requisitos de navegación RNP 0.3 para ambas pistas. En el escenario de que alguna de las 2 aeronaves aproximando de manera simultánea

invada la NTZ, en el DOC 9643⁴² de la OACI se establece la realización de una evaluación de superficies de obstáculos para aproximaciones paralelas (PAOAS) la cual se encarga de analizar las zonas utilizadas por las rutas de escape en aproximación final para el escenario descrito anteriormente.

Las PAOAS aplican en aquellos escenarios donde las pistas se encuentran separadas entre los 1.035 [M] y 1.310 [M]⁴³ por lo que no son requeridas en la actualidad de SCEL, ya que las pistas cuentan con una separación superior a 1.500 [M] no así en el escenario propuesto para una tercera pista en SCEL que solo tendría 1.200[M] de separación con la actual RWY17R. Una vez presentados y analizados los requerimientos respecto a zonas de protección exigidas para aproximaciones instrumentales paralelas, se debe revisar si la divergencia entre las trayectorias de las respectivas frustradas cumplen con lo exigido en la norma.

De acuerdo con lo descrito en el DOC 9643⁴⁴ de la OACI, debe existir una divergencia de al menos 30° grados entre las trayectorias de las respectivas frustradas para que se puedan realizar aproximaciones instrumentales simultaneas.

En el caso de SCEL, la RWY 17L tiene su frustrada que diverge en 30° respecto al heading de pista y de las salidas o frustradas por la RWY 17R. Esto quiere decir que las pistas en SCEL cumplen con los requisitos, respecto a las frustradas, para realizar aproximaciones paralelas independientes.



Imagen 3.12 Frustrada divergente en 30° para RWY 17L respecto a salidas por RWY 17R.

⁴² (Doc 9643, Manual on Simultaneous Operations on Parallel or Near-Parallel Instrument, 2020, pág. 25)

⁴³ (Doc 9643, Manual on Simultaneous Operations on Parallel or Near-Parallel Instrument, 2020, pág. 28)

⁴⁴ (Doc 9643, Manual on Simultaneous Operations on Parallel or Near-Parallel Instrument, 2020, pág. 23)

Respecto a los requerimientos relacionados a control ATC, se presentan a continuación los puntos más relevantes respecto a la operación de aproximaciones instrumentales simultaneas en SCCL:

- Una precisión mínima del azimut del SSR de 0,3 grados (una sigma), o que los sistemas MLAT o ADS-B demuestren un rendimiento equivalente o superior a dicho requisito y un periodo de actualización menor o igual a 5 [S]
- Tan pronto como sea posible tras establecer contacto con el control de aproximación, se debe informar a la aeronave que se están utilizando aproximaciones paralelas independientes. El uso del ATIS es un método aceptado para entregar esta información.
- Los controladores deben informar lo antes posible a la aeronave sobre la pista asignada o el procedimiento de aproximación, junto con cualquier información adicional relevante.
- Las aproximaciones deben ser monitoreadas por:
 - Un controlador de monitoreo por pista.
 - Un solo controlador para dos pistas (si así lo permite un estudio de seguridad aprobado).
- El monitoreo debe iniciarse desde el punto en que se reduce la separación vertical de 300 [M] (1000 [FT]) y mantenerse hasta el punto definido en los procedimientos aplicables.
- Siempre que se realicen aproximaciones paralelas independientes, se deben asignar controladores separados para secuenciar y separar las aeronaves por pista.
- Se debe mantener una separación vertical de 1000 [FT] y una separación horizontal mínima de 3 [NM] entre aeronaves en la misma trayectoria final de aproximación, o 2,5 [NM] si así lo autoriza la autoridad ATS, a menos que se requiera mayor separación por estela turbulenta u otras razones.

Para obtener la lista completa de los requisitos que se deben cumplir para realizar operaciones instrumentales simultaneas, se debe revisar el DOC 9643 de la OACI (2.2.1 - Requirements and procedures, 2020).

Despegues simultáneos:

De acuerdo con lo establecido en el DOC 9643 de la OACI (3.2 - Requirements and Procedures, 2020) para el caso de 2 salidas independientes, la norma establece los siguientes requisitos para poder operar en condiciones IFR:

- Una separación mayor a 760 [M] entre las líneas centrales de cada pista.
- Una divergencia en las trayectorias mayor a 15° inmediatamente después del despegue.
- Divergencia de al menos 10° entre trayectorias si:
 - Ambas aeronaves están volando una SID RNAV o RNP.
 - El viraje comienza, a lo más, 2 [NM] desde el final de la pista utilizada.
- Se dispone de un sistema de vigilancia ATS adecuado, capaz de identificar la aeronave a una distancia de 1,9 [KM] (1,0 [NM]) del extremo de la pista.
- Los procedimientos operacionales ATS aseguran que se logre la divergencia de trayectoria requerida.

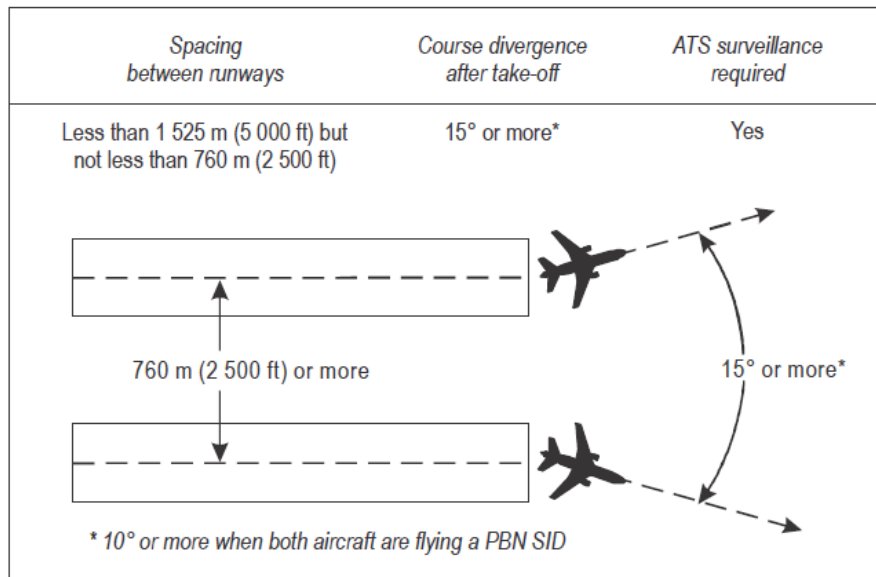


Imagen 3.13 (Figure 3-1. Independent instrument departures when parallel runway spacing is less than 1 525 m (5 000 ft) but no less than 760 m (2 500 ft), 2020, pág. 42)

En la actualidad, el aeropuerto SCEL no cuenta con procedimientos de despegue aprobados para ser realizados de manera simultánea, ni siquiera considerando condiciones de visibilidad especiales como ocurre en el caso de las aproximaciones. Por estos motivos se debe evaluar

el escenario actual de SCCL y definir si existen procedimientos SID que cumplan con los requisitos descritos anteriormente respecto a las salidas instrumentales simultáneas.

Se evalúa el escenario para 2 salidas simultáneas, donde el primer vuelo despegue desde la RWY 17R utilizando la SID DONTI 1J, DILOK 1J o GUVOL 1J y el segundo vuelo que despegue por la RWY 17L utiliza la SID NEBEG 7C, LINER 6C, ANGOD 6C o ALBAL 7C. Estas combinaciones permiten una divergencia en las trayectorias voladas debido a que las SID utilizadas por RWY 17R tienen un viraje a la derecha después del despegue como se observa en la **Imagen 3.14**.

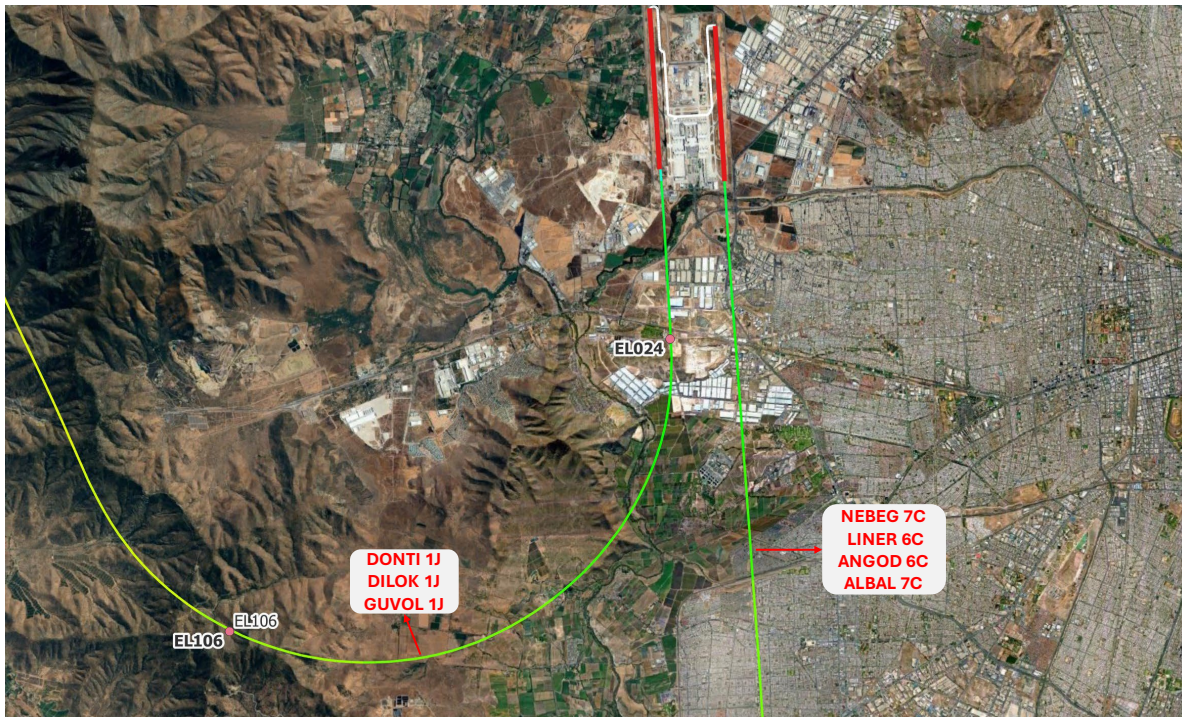


Imagen 3.14 Divergencia entre las trayectorias de posibles despegues simultáneos, SCCL.

Esta divergencia exigida en la normativa internacional solo se cumple cuando se considera una salida por RWY 17R que utiliza la SID DONTI 1J o similares, y otra salida por RWY 17L que utiliza cualquier SID que ascienda hacia el sur manteniendo el heading de pista. Es por estos motivos que, para la simulación en SIMMOD PRO!, solo se considera esta combinación de procedimientos al momento de evaluar el escenario optimizado de SCCL, el cual considera salidas y llegadas simultáneas independientes, a diferencia del escenario actual, el cual considera operaciones segregadas y solo se incluyen aproximaciones simultáneas cuando se junta tráfico proveniente del sur con otro proveniente del norte.

3.3. Recopilaciones variables operacionales.

3.3.1. Recopilación de información desde BBDD.

Para partir con la recopilación de la información requerida para cada variable a utilizar en el software se analiza la bitácora de operaciones compartida por la DGAC⁴⁵.

Esta BBDD entrega información respecto a la cantidad de operaciones, separadas por pista y tipo de operación, modelo y categoría de la aeronave, origen o destino del vuelo y la hora en la cual se realizó la operación.

Para este levantamiento de información se consideran las bitácoras operacionales de SCEL del año 2022, 2023 y 2024.

AÑO	CANTIDAD DE OPERACIONES
2022	130.983
2023	154.150
2024	170.597
TOTAL	455.730

Tabla 3.4 Cantidad de operaciones comerciales y de carga realizadas por año en SCEL.

Del total de operaciones analizadas, 227.842 (50%) corresponden a aterrizajes y 227.888 (50%) fueron despegues, lo que evidencia que la relación entre aterrizajes y despegues es de 1:1.

La orientación de las pistas utilizadas es, en el 99% de las operaciones, de norte a sur utilizando la RWY 17L para el 48% de las operaciones y la RWY 17R en el 51%.

⁴⁵ (Bitacora operaciones [Base de datos], 2024)

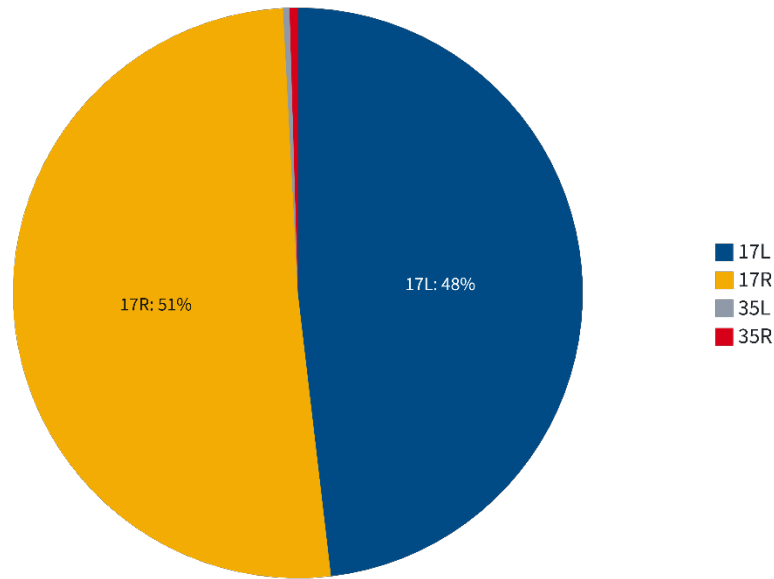


Gráfico 3.1 Porcentaje de operaciones realizadas por pista de SCEL, periodo 2022-2023.

Del total de aterrizajes realizados durante 2022 y 2023, un 67,4% fueron realizados por RWY 17L y un 31,2% por RWY 17R. Respecto a los despegues, el 70,3% fueron realizados por RWY 17R y un 28,4% por RWY 17L. Estos números ratifican lo declarado por la DGAC respecto a que, bajo la modalidad de operaciones segregadas, la RWY 17L se utiliza para aterrizajes y la RWY 17R para despegues.

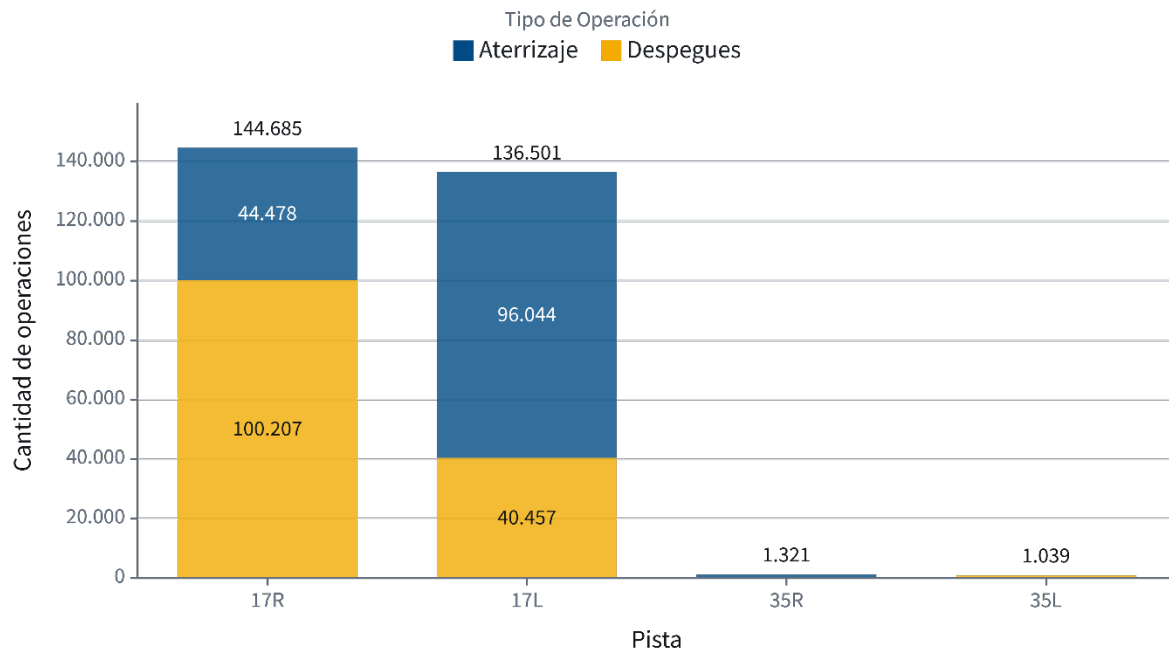


Gráfico 3.2 Distribución de las operaciones por pista de SCEL.

Respecto a la cantidad de operaciones máxima realizadas por hora durante el 2024, se alcanzó la cifra de 41 operaciones de acuerdo con la bitácora compartida por DGAC. A continuación se presentan las 10 horas con más operaciones registradas durante 2024.

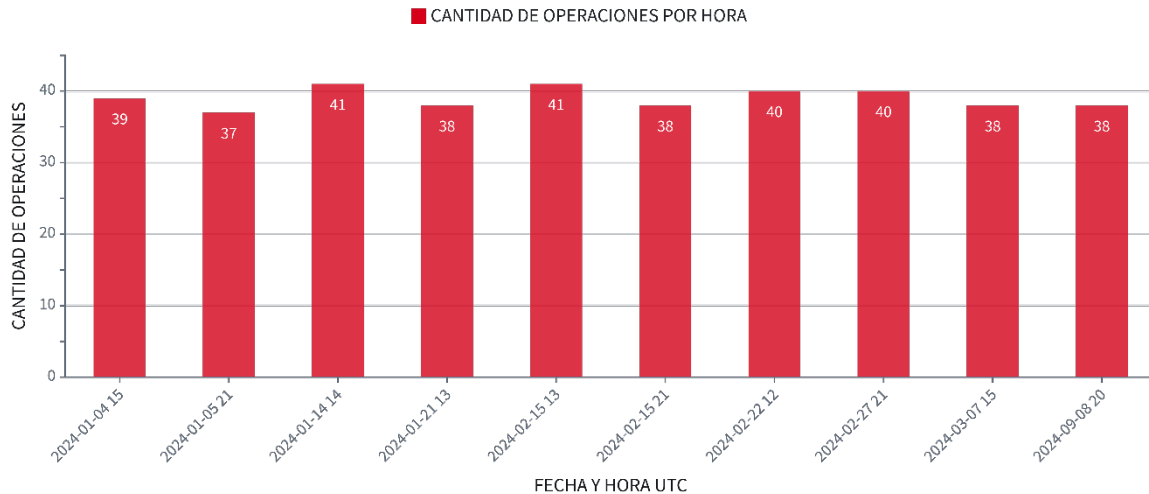


Gráfico 3.3 Horas con más operaciones realizadas durante 2024 en SCEL.

Continuando con las aeronaves que operan en SCEL y su respectiva categoría, es importante definir el criterio que se utilizara para segmentar las aeronaves en cada categoría.

Para realizar esta categorización se utilizan los criterios establecidos por la OACI en el capítulo 4.9.1.1 del Doc. 4444 “Air Traffic Management”⁴⁶ donde divide las aeronaves en 4 categorías en función de su peso máximo de despegue (MTOW). Los criterios son los siguientes:

Categoría	MTOW
Super (J)	A380 y AN225
Heavy (H)	≥ 136.000 [Kg]
Medium (M)	< 136.000 [Kg] > 7.000 [Kg]
Light (L)	≤ 7.000 [Kg]

Tabla 3.5 Criterios para la categorización de aeronaves según OACI.

Para determinar qué porcentaje de las operaciones son realizadas por cada categoría de aeronaves, se utilizan los datos entregados en la bitácora de operaciones de 2024 de la cual se obtienen los siguientes porcentajes:

⁴⁶ (Doc 4444, Procedures for Air Navigation Services (PANS) - Air Traffic Management, 2016)

Categoría	Porcentaje de operaciones
H	11%
L	1%
M	88%

Tabla 3.6 Porcentaje de operaciones realizadas por categoría de aeronaves OACI.

Estos números evidencian que las aeronaves más utilizadas, por un gran margen, pertenecen a la categoría MEDIUM de la OACI donde se pueden encontrar aeronaves como la familia A320 de Airbus y la familia B737 de Boeing.

Continuando con los orígenes/destinos que se operan desde o hacia SCEL, se utiliza la bitácora de operaciones del 2024 para determinar los orígenes o destinos con más operaciones durante el año. Los resultados son los siguientes:

APTO	ARR	DEP	TOTAL	APTO	ARR	DEP	TOTAL	APTO	ARR	DEP	TOTAL
SCCF	6719	6715	13434	SUMU	1174	1170	2344	YSSY	252	252	504
SCFA	6195	6089	12284	LEMD	1071	1076	2147	SKRG	239	245	484
SPJC	5140	5146	10286	KMIA	1010	1013	2023	SPZO	225	226	451
SCTE	4983	5026	10009	SCNK	857	812	1669	EGLL	205	206	411
SCIE	4709	4714	9423	SCPQ	743	745	1488	SAZS	189	180	369
SCDA	4374	4349	8723	SCBA	747	736	1483	SCIR	176	191	367
SBGR	4128	4138	8266	MMMX	504	506	1010	SBBR	166	165	331
SCQP	3352	3366	6718	SCIP	469	479	948	YMML	161	162	323
SCSE	3243	3349	6592	SEGU	387	381	768	SPRU	159	161	320
SABE	3275	3249	6524	KATL	373	373	746	LEBL	157	157	314
SBGL	2481	2485	4966	KJFK	362	363	725	KDFW	156	157	313
SCAT	2440	2412	4852	LFPG	358	358	716	KIAH	155	155	310
SAEZ	2370	2404	4774	SCNT	359	356	715	SCKP	114	190	304
SKBO	2086	2076	4162	NZAA	356	357	713	SLVR	204	67	271
SCCI	1896	1879	3775	SACO	339	340	679	SCEL	192	73	265
MPTO	1884	1885	3769	SCES	309	343	652	SBFI	127	126	253
SCAR	1861	1856	3717	KLAX	323	323	646	MDSD	110	119	229
SBFL	1450	1455	2905	SBCT	309	310	619	CYYZ	113	113	226
SCVD	1403	1410	2813	SBCF	306	309	615	SCPC	108	114	222
SCJO	1289	1282	2571	SKCL	289	295	584	MDPC	91	93	184
SAME	1189	1185	2374	SGAS	275	273	548	SCVM	99	81	180

Tabla 3.7. Aeropuertos con más operaciones desde o hacia SCEL durante 2024.

En la **Tabla 3.6** se presentan los 63 aeropuertos que más vuelos tienen desde o hacia SCEL, siendo el aeropuerto de Calama (SCCF) el que más operaciones tuvo, seguido por el

aeropuerto de Antofagasta (SCFA) y en tercera posición el aeropuerto de Lima (SPJC) siendo el que más operaciones tuvo en el extranjero.

Cuando se realiza este mismo análisis pero se considera solo la hora que más operaciones tuvo durante todo 2024, SCCF sigue siendo el aeropuerto con más operaciones desde o hacia SCEL.

En base a la cantidad de operaciones realizadas desde o hacia cada aeropuerto en la tabla y la ubicación geográfica en la que se encuentran, se debe determinar que procedimientos de aproximación y salida se utilizaran en estos vuelos.

Para esto, y debido a que no se cuenta con la información de qué procedimientos se utilizaron en cada vuelo de la bitácora compartida por la DGAC, se analizan los procedimientos existentes (SID, STAR, IAC) para determinar cuál es el más conveniente por aeropuerto para luego comparar los resultados con la data estadística proporcionada por Sky Airline, en la cual, se detalla que SID y STAR fueron utilizadas para cada uno de sus vuelos.

De acuerdo con la bitácora de operaciones del 2024, el 49% de los vuelos se realizaron desde o hacia un aeropuerto que se ubica al norte de Santiago, un 25% fueron vuelos hacia el este como por ejemplo Argentina, Brasil y Europa y un 24% de los vuelos fueron hacia el sur de Chile y Argentina. El 2% restante fueron vuelos realizados hacia el oeste, principalmente a Nueva Zelanda, Australia e Isla de Pascua.

Ubicación	% vuelos
E	25.60%
N	48.84%
O	1.52%
S	24.04%

Tabla 3.8 Porcentajes de vuelos en base a ubicación geográfica de Origen/Destino.

Para poder determinar los procedimientos más utilizados en función de la ubicación del aeropuerto de origen/destino, es importante analizar de que aerovía parten o llegan los procedimientos existentes para así poder elegir que SID o STAR es la más óptima a utilizar. Además de la información disponible en la bitácora de operaciones compartida por la DGAC, se utiliza el historial de vuelos compartido por Sky Airline que cuenta con la información respecto a que SID o STAR se utilizaron para sus vuelos y así poder verificar que los procedimientos seleccionados para cada aeropuerto son correctos y cumplen con una lógica operacional.

Este análisis se divide por ubicación geográfica respecto al aeropuerto de origen/destino y por tipo de procedimiento.

Antes de establecer que procedimientos se utilizaran, dependiendo la ubicación del aeropuerto de origen o destino, se analizan los distintos procedimientos utilizados por Sky Airline en el último año de operaciones para determinar cuáles son las alternativas y cuáles son los más utilizados.

Desde o hacia el NORTE:

Para las salidas que se dirigen al norte se utiliza la SID DONTI1J en el 80% de los vuelos, seguida por la SID DILOK1J con el 19% de los vuelos.

Procedimiento	% de uso.
DONTI	80.32%
DILOK	19.22%
TENUT5	0.42%
VTN6	0.04%

Tabla 3.9 Porcentaje de uso para cada SID utilizada en vuelos hacia el NORTE.

Es importante destacar que todos los vuelos que utilizan la SID DILOK1J se dirigen hacia SCCF dejando la SID DONTI1J como el único procedimiento utilizado en aquellos vuelos que se dirigen hacia el norte.

Respecto a los vuelos que aproximan desde el norte, el 100% de los vuelos utilizan la STAR SIMOK7B independiente del aeropuerto de origen.

Desde o hacia el SUR:

En el caso de los vuelos que se dirigen al sur, existen 3 procedimientos que abarcan el 99,7% de las operaciones los cuales son:

Procedimiento	% de uso.
ANGOD6C	55.97%
GELUS5B	35.08%
LINER6C	8.50%

Tabla 3.10 Porcentaje de uso para cada SID utilizada en vuelos hacia el SUR.

La SID ANGOD6C es utilizada por los vuelos que se dirigen hacia SCTE, SCQP y SCJO.

La SID GELUS5B es utilizada por los vuelos que se dirigen hacia SCIE, SCVD y SCPQ.

La SID LINER6C es utilizada por los vuelos que se dirigen hacia SAZS, SCCI, SCNT, SCBA y SAWC.

Respecto a los vuelos que aproximan desde el sur, el procedimiento utilizado es único y varía dependiendo la RWY seleccionada para aterrizar.

Procedimiento	% de uso.	RWY
EROLO2D	53%	17R
EROLO8A	47%	17L

Tabla 3.11 Porcentaje de uso para cada STAR utilizada en vuelos desde el SUR.

Como se observa en la **Tabla 3.10**, el 53% de los vuelos utiliza la STAR EROLO2D que conecta la aerovía con la IAC 18, que solo permite aterrizajes en RWY 17R. El 47% de los vuelos restantes utiliza la STAR EROLO8A que conecta la aerovía con procedimientos que permiten aterrizajes en RWY 17L.

Desde o hacia el ESTE:

Continuando con los vuelos que se dirigen al este, las SID más utilizadas son las siguientes:

Procedimiento	% de uso.
ALBAL7C	45.59%
NEBEG7C	43.89%
GUVOL	7.92%

Tabla 3.12 Porcentaje de uso para cada SID utilizada en vuelos hacia el ESTE.

En el caso de las salidas hacia el este el uso se divide principalmente en función de la zona en la que se encuentra el aeropuerto de destino. Los vuelos que se dirigen hacia Argentina y Uruguay utilizan principalmente la SID ALBAL7C y los vuelos que se dirigen hacia Brasil utilizan principalmente la SID NEBEG7C y en escenarios particulares (Meteorología) utilizan la SID GUVOL1J.

Respecto a los vuelos provenientes del este, más del 95% de los vuelos utilizan la STAR UMKAL7C independientemente si el vuelo proviene de Argentina, Uruguay o Brasil.

Debido a la lejanía de los destinos ubicados al oeste, Sky Airline no opera hacia esos destinos por lo que no se tiene información operacional al respecto.

Una vez analizada la información proporcionada por Sky Airline e identificados los procedimientos utilizados por origen o destino, se continúa con el análisis de la bitácora de operaciones compartida por DGAC para poder establecer el procedimiento a utilizar en función del destino u origen del cual proviene el vuelo.

Al igual que en el análisis de la data compartida por Sky Airline, se evalúan los aeropuertos en base al tipo de procedimiento (SID/STAR) y la ubicación en la que se encuentran respecto a SCEL.

Se parten analizando los distintos procedimientos de salida en función de la ubicación del destino:

SID hacia el norte:

Esta es la zona desde o hacia la cual se realizaron más vuelos durante el 2024. En esta zona se consideran todos los aeropuertos del norte de Chile y todos los aeropuertos de América a excepción de aquellos ubicados en Brasil y Argentina.

Para el caso de las salidas, existen 2 procedimientos principales que dirigen el flujo desde SCEL hacia el norte los cuales son:

- DONTI 1J: Conecta las salidas del aeropuerto SCEL con las aerovías UL780, UT131, UL405 y UQ802. Estas aerovías conectan de manera directa con todos los aeropuertos del norte de Chile a excepción de SCCF y con aquellos aeropuertos que se encuentran en todos los países de América que están al norte de SCEL.
- DILOK 1J: Se utiliza principalmente para conectar SCEL con el aeropuerto más transitado desde o hacia Santiago, SCCF. Esta SID conecta con la aerovía UQ814 que conecta, por el interior, directamente con el aeropuerto de Calama.

SID hacia el este:

Se consideran los aeropuertos dentro de Argentina, Brasil y Europa. Los procedimientos disponibles para el flujo que se dirige al este son los siguientes:

- ALBAL 7C: Une el aeropuerto con la aerovía UM424, que conecta con los aeropuertos de Uruguay y Argentina principalmente.
- NEBEG 7C: Conexión del aeropuerto con aerovía UL531, la cual es utilizada para conectar posteriormente con otras aerovías que se dirigen a Brasil. El flujo principal es desde o hacia aeropuertos de Brasil con algunos vuelos hacia Argentina.
- GUVOL 1J: SID utilizada por los vuelos que se dirigen a Europa, además de ser utilizada de manera esporádica por vuelos que se dirigen a Paraguay o al norte de Brasil.

SID hacia el sur:

Se consideran aeropuertos ubicados al sur de Chile y Argentina. Existen 3 aerovías principales que dirigen el flujo desde SCEL hacia el sur siendo conectado por las siguientes SID:

- LINER 6C: Esta SID conecta el aeropuerto con la aerovía UQ805, la cual se encuentra ubicada más pegada a la frontera con Argentina y es utilizada para conectar con aeropuertos como SCBA, SCCI, SCNT y aeropuertos de Argentina como SAWC y SAZS.
- ANGOD 6C: Conecta el aeropuerto con la aerovía UQ803 y es utilizada por aeronaves que se dirigen a aeropuertos como SCTE, SCQP y SCJO.
- GELUS 5B: Conecta con la aerovía UQ809 y es utilizada por vuelos que se dirigen principalmente a SCIE, SCVD y SCPQ. Además se utiliza de forma esporádica para destinos como SCQP y SCJO al igual que la SID ANGOD 6C.

SID hacia el oeste:

Representan menos del 2% de los vuelos y considera básicamente a los aeropuertos de Australia, Nueva Zelanda e Isla de Pascua. Las SID disponibles son las siguientes:

- ANGOD 6C: utilizada por los vuelos que se dirigen a Australia y Nueva Zelanda.
- SALBA 8 o DOMINGO 6: Utilizadas por aquellos vuelos que se dirigen a Isla de Pascua.

Una vez definidas las SID que se utilizará dependiendo del destino gracias a la información compartida por Sky Airline, los resultados son los siguientes:

PROCEDIMIENTO SID	CANTIDAD DE VUELOS 2024	% DEL TOTAL
DONTI 1J	34233	42.1%
GELUS 5B	11524	14.2%
NEBEG 7C	9583	11.8%
ALBAL 7C	8765	10.8%
DILOK 1J	6719	8.3%
ANGOD 6C	5799	7.1%
LINER 6C	2982	3.7%
GUVOL 1J	1805	2.2%
TOTAL	81410	100.0%

Tabla 3.13 Cantidad y porcentaje de uso por SID durante 2024.

Nota: Se consideran aquellos procedimientos con más del 1% del total de operaciones anuales.

Como se observa en la **Tabla 3.12**, el procedimiento de salidas estandarizadas más utilizado es DONTI 1J, el cual es utilizado para destinos ubicados al norte de SCEL, seguido de la SID GELUS 5B utilizada por los vuelos que se dirigen al sur y NEBEG 7C que es utilizada por los vuelos que se dirigen a Brasil y Paraguay.

Una vez determinado el porcentaje de uso de cada SID en función de su destino, se continua con el mismo análisis realizado para las SID, pero considerando vuelos que tienen como destino SCEL.

STAR desde el norte:

Existen 2 STAR que conectan las aerovías provenientes del norte con el aeropuerto SCEL las cuales son:

- SIMOK 7B: Conecta las aerovías UV204-208, UQ803-815 y UL302 con el aeropuerto SCEL. Estas aerovías concentran todo el tráfico proveniente del norte y lo conecta con aproximaciones a ambas pistas (17R/17L).
- SUKSA 2A: STAR paralela a SIMOK 7B que tiene como objetivo descongestionar el tráfico que viene del norte, ofreciendo una trayectoria que puede aproximar exclusivamente a RWY 17R. No conecta directamente con ninguna aerovía pero con el uso de un directo es posible conectar con las mismas aerovías que SIMOK 7B.

STAR desde el este:

Existen 2 STAR que funcionan como conectores entre las aerovías provenientes del este y las aproximaciones a las pistas de SCEL. El uso de estas STAR es en función de que tan al noreste se encuentra el aeropuerto de origen.

- ASIMO 7D: Conecta las aerovías UM799-529 y UL322 con las aproximaciones a SCEL. Es usada generalmente por vuelos provenientes de Europa y Paraguay siendo utilizada para vuelos desde Brasil cuando existen tormentas sobre las rutas más directas.
- UMKAL 7C: STAR principal utilizada por todos los vuelos provenientes de Argentina, Uruguay y Brasil. Conecta las aerovías UL405, UT687 y UZ105 con aproximaciones a ambas pistas de SCEL.

Es importante destacar que las STAR SIMOK 7B, ASIMO 7D y UMKAL 7C convergen a un mismo punto llamado UGOLA, generando un cuello de botella al concentrar más del 70% de los vuelos que aproximan a SCEL. Por este motivo es que se crea las STAR

SUKSA 2A para descongestionar el waypoint UGOLA ofreciendo una alternativa a todo el flujo que viene del norte y aproxima exclusivamente a RWY 17R.

STAR desde el sur:

Existe una STAR que es la que concentra la mayoría del flujo proveniente del sur que se divide en 2 procedimientos dependiendo a que pista se desea aproximar.

- EROLO 8A: Conecta las aerovías UQ808-810-802 y UT122 con aproximaciones a ambas pistas pero con limitaciones operacional para la RWY 17R ya que implica cruzar la trayectoria de las aeronaves aproximando a RWY 17L.
- EROLO 2D: Es el mismo procedimiento que la STAR anterior pero conecta, en el waypoint VOVPO, con una aproximación RNP (AR) a RWY 17R.



Imagen 3.15 STAR EROLO 2D y EROLO 8A conectando con aproximación a SCEL.

STAR desde el oeste:

Existen 2 STAR utilizadas por el flujo que viene del oeste y al igual que en el escenario de los vuelos provenientes del este, la STAR a utilizar depende de que tan al suroeste provenga el vuelo.

- EROLO 2D, EROLO 8A: Utilizada por los vuelos provenientes de Australia y Nueva Zelanda. Como se explicó en las STAR desde el sur, el uso de una u otra STAR depende de la pista a la cual se desee aproximar.
- VENTANAS 1A: STAR utilizada por los vuelos provenientes de Isla de Pascua para luego conectar con aproximaciones a cualquiera de las dos pistas de SCEL.

Una vez definidas las STAR a utilizar en función de la ubicación del aeropuerto de origen y la aerovía utilizada para llegar a SCEL, los resultados de la distribución de uso son los siguientes:

PROCEDIMIENTO STAR	CANTIDAD DE VUELOS 2024	% DEL TOTAL
SIMOK 7B	39090	47.9%
EROLO	20269	24.9%
UMKAL 7C	19956	24.5%
ASIMO 7D	2210	2.7%
TOTAL	81525	100.0%

Tabla 3.14 Cantidad y porcentaje de uso por STAR durante 2024.

Se consideran aquellos procedimientos con más del 1% del total de operaciones anuales.

Estos resultados contienen el supuesto que todo el flujo proveniente del norte utiliza la STAR SIMOK 7B y la STAR SUKSA 1A no es utilizada. Para el cálculo de la capacidad operacional, bajo el escenario actual, se considerará que un 10% del flujo proveniente del norte utilizara la STAR SUKSA 1A, pese a que, de acuerdo con la información entregada por Sky Airline, no es una STAR que se haya utilizado durante el último año por esta compañía, pero si existen vuelos de otras compañías que utilizan esta STAR.

Una vez redistribuido el flujo proveniente del norte, los resultados son los siguientes:

PROCEDIMIENTO STAR	CANTIDAD DE VUELOS 2024	% DEL TOTAL
SIMOK 7B	35181	43.2%
EROLO	20269	24.9%
UMKAL 7C	19956	24.5%
SUKSA 2A	3909	4.8%
ASIMO 7D	2210	2.7%
TOTAL	81994	100.0%

Tabla 3.15 Cantidad y porcentaje de uso por STAR durante 2024 considerando redistribución del flujo.

Se consideran aquellos procedimientos con más del 1% del total de operaciones anuales.

Una vez definidas la STAR a utilizar, se deben seleccionar las IAC que conectaran las STAR con las pistas del aeropuerto SCEL. Para todos los procedimientos que aproximan a RWY 17L el procedimiento a utilizar es la IAC 16. Para el caso de las aeronaves que aproximan a RWY 17R, existen 3 IAC que conectan las STAR correspondientes con la pista:

- IAC 13: Conecta STAR SIKOB 7C con RWY 17R.
- IAC 17: Conecta STAR SUKSA 1A con RWY 17R.
- IAC 18: Conecta STAR EROLO 2D con RWY 17R.

Estos serán los 4 procedimientos de aproximación que serán modelados en Simmod Pro! que conectarán las STAR con las pistas de aterrizaje de SCEL.

Con el objetivo de poder modelar de la mejor manera posible el tráfico existente en SCEL se debe considerar qué porcentaje de los vuelos realizados, por cada procedimiento, fueron con aeronaves categoría Heavy y cuantos fueron realizados con aeronaves categoría Medium ya que serán las únicas categorías consideradas ya que abarcan el 98% de las operaciones.

Los resultados obtenidos para este punto fueron los siguientes:

PROCEDIMIENTO SID/STAR	CAT H	CAT M
ALBAL 7C	5.8%	94.2%
ANGOD 6C	13.3%	86.7%
ASIMO 7D	87.6%	12.4%
DILOK 1J	0.0%	100.0%
DONTI 1J	20.8%	79.2%
EROLO	3.9%	96.1%
GELUS 5B	0.0%	100.0%
GUVOL 1J	100.0%	0.0%
LINER 6C	0.6%	99.4%
NEBEG 7C	9.7%	90.3%
SUKSA 2A	13.0%	87.0%
SIMOK 7B	13.0%	87.0%
UMKAL 7C	16.8%	83.2%
TOTAL	13.7%	86.3%

Tabla 3.16 Porcentaje de vuelos realizados por cada STAR/SID a modelar en Simmod Pro!.

Una vez obtenidos estos resultados y definida la cantidad de vuelos, segmentados por categoría de aeronave, que utiliza cada STAR y SID que será modelada en Simmod Pro!, se puede continuar con el levantamiento de información relacionada con las velocidades durante aproximación y despegue y los tiempos que le toma a las aeronaves aterrizar o despegar desde SCEL.

3.3.2. Cálculo de variables mediante herramienta Skywise.

Para poder determinar los tiempos de ocupación de pista y las velocidades durante aproximación y despegue desde SCEL, se utilizará la herramienta Skywise, propiedad de Airbus, la cual permite obtener distintos datos provenientes de los sensores DAR de toda la flota de Sky Airline. Los primeros datos que se recopilieron fueron las velocidades durante la fase de aproximación y despegue.

Velocidades durante la aproximación a SCEL.

Para poder obtener las velocidades a utilizar en la simulación, primero se debe determinar que procedimientos de aproximación serán modelados en Simmod Pro!. De acuerdo con la distribución del flujo definida en el capítulo 3.3.1, las STAR a modelar son las siguientes:

PROCEDIMIENTO STAR
SIMOK 7B
EROLO
UMKAL 7C
SUKSA 1A
ASIMO 7D

Tabla 3.17 STAR a modelar en Simmod Pro!

De igual manera, las IAC seleccionadas para ser modeladas en Simmod Pro! son las siguientes:

PROCEDIMIENTO IAC
IAC 13
IAC 16
IAC 17
IAC 18

Tabla 3.18 IAC que serán modeladas en Simmod Pro!.

Una vez definidos los procedimientos que serán modelados, se debe obtener la información respecto a los waypoints a modelar para así poder obtener las velocidades.

En el documento AMDT 99 se encuentran las coordenadas para todos los waypoint existentes en los procedimientos de llegadas y salidas de SCEL.

Una vez obtenidas las coordenadas de todos los waypoints que serán modelados en Simmod Pro!, se debe continuar con todo el proceso que tiene como resultado final las velocidades promedio en cada uno de los waypoints para aeronaves de **categoría Medium**.

Para obtener estas velocidades se debe comenzar con modelar gráficamente cada uno de estos puntos en la herramienta QGIS con el objetivo de poder generar zonas buffers para cada uno de los puntos evaluados. El propósito detrás de generar estas zonas envolventes para cada uno de los waypoints a modelar es obtener los vértices de cada una de estas zonas y así obtener las coordenadas que permitirán definir las zonas evaluadas en Skywise.



Imagen 3.16 Ejemplo de vértices y zonas definidas para la evaluación de velocidades en aproximación.

Una vez obtenidas las coordenadas geográficas de ambos vértices que definen las zonas evaluadas, se deben ingresar como restricciones dentro de la herramienta Skywise.

Para obtener los resultados deseados desde esta aplicación, se deben utilizar 4 sensores DAR que serán sometidos a un par de restricciones que tienen como objetivo definir la zona que se quiere evaluar. Estos 4 sensores son los siguientes:

- Present position latitude: Sensor que entrega información respecto a la latitud.
- Present position longitude: Sensor que entrega información respecto a la longitud.
- Flight phase: Entrega información respecto a la fase de vuelo en la cual se encuentra la aeronave de acuerdo con la FWC.
- Corrected computed air speed (IAS): Sensor que entrega la velocidad del avión corregida durante todo el vuelo.

Una vez identificados estos sensores se deben aplicar las restricciones correspondientes que para los sensores de latitud y longitud corresponden a coordenadas y para el sensor relacionado a las fases de vuelo se busca que corresponda a la fase 6 que contempla el tramo desde los 1.500 [Ft] después del despegue hasta los 800 [Ft] antes del aterrizaje.

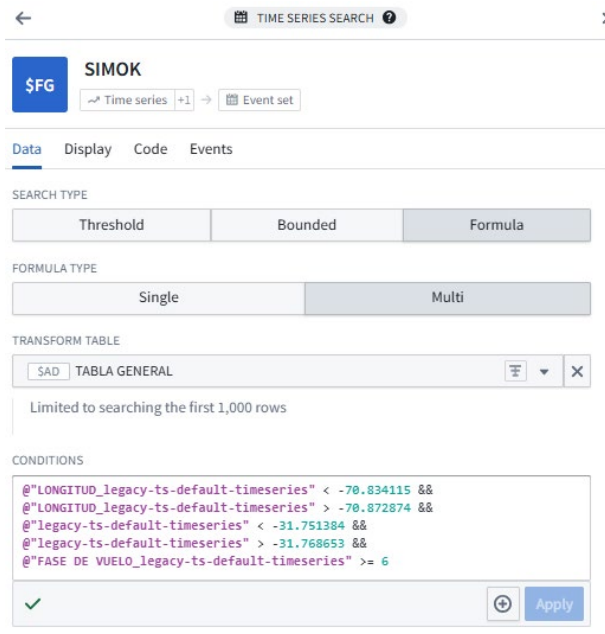


Imagen 3.17 Ejemplo de las condiciones utilizadas para definir las zonas de evaluación.

Una vez definidas las condiciones, Skywise entrega una tabla con todos los vuelos que sobrevolaron la zona evaluada y se encontraban en fase de vuelo 6. Gracias a esta tabla se puede obtener la velocidad que tenía cada vuelo al momento que sobrevolarla zona evaluada lo que posteriormente permite calcular la velocidad promedio entre todos los vuelos que pasaron por dicha zona.

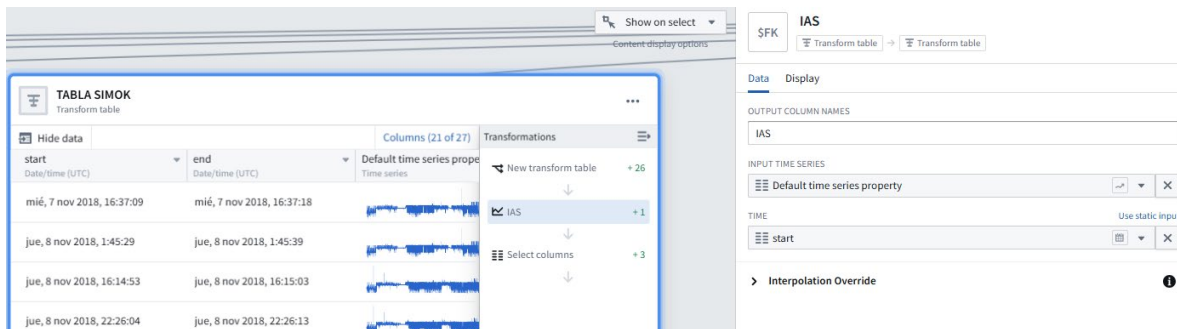


Imagen 3.18 Velocidad IAS al momento de ingresar a la zona evaluada.

Una vez realizados estos pasos se puede determinar la velocidad promedio de todos los vuelos analizados. A continuación se presentan los resultados obtenidos:

WAYPOINT	IAS PROMEDIO	CAT VUELOS	WAYPOINT	IAS PROMEDIO	CAT VUELOS
SIMOK	272	33K	ASIMO	270	120
DABIT	278	33K	EL790	276	200
MORPA	274	32K	VULBI	277	200
VUDOG	250	33K	EL570	275	400
UGOLA	238	44K	UMKAL	276	10K
EL220	230	36K	LOSAN	273	10K
PUMAR	223	37K	EL449	273	9K
SUKSA	275	120	SAFEL	263	12K
EL681	271	75	EROLO	258	3K
EL483	259	150	KADAK	278	5K
EL383	233	170	MAPOC	272	4K
ENPAK	238	270	VOVPO	231	6K
EL239	247	461	PULKI	227	7K
EDRIK	244	500	ISILO	213	7K

Tabla 3.19 Velocidades promedio de aeronaves CAT Medium para todos los waypoint analizados STAR.

Como se observa en la **Tabla 3.19**, la cantidad de vuelos analizados se encuentra por sobre los mil vuelos en la mayoría de waypoint analizados, a excepción de aquellos waypoint pertenecientes a STAR que no son utilizadas de manera frecuente por Sky Airline.

Para obtener la velocidad promedio, en cada waypoint, de las aeronaves categoría Heavy la metodología utilizada fue analizar 20 vuelos descargados desde Flight Radar⁴⁷ y analizar las velocidades marcadas en las zonas definidas para evaluación.



Imagen 3.19 Puntos de marcaje evaluados, vuelos extraídos de **Flight Radar**.

Los resultados obtenidos para las aeronaves categoría Heavy son los siguientes:

⁴⁷ (Flightradar24, 2025)

WAYPOINT	IAS PROMEDIO	WAYPOINT	IAS PROMEDIO
SIMOK	421	ASIMO	382
DABIT	405	EL790	385
MORPA	373	VULBI	328
VUDOG	307	EL570	348
UGOLA	286	UMKAL	385
EL220	279	LOSAN	380
PUMAR	266	EL449	380
SUKSA	478	SAFEL	380
EL681	405	EROLO	463
EL483	373	KADAK	362
EL383	307	MAPOC	348
ENPAK	286	VOVPO	273
EL239	279	PULKI	246
EDRIK	236	ISILO	232

Tabla 3.20 Velocidades promedio de aeronaves CAT Heavy para todos los waypoint analizados STAR.

Para la obtención de las velocidades en aproximación final a las pistas de SCEL, se utiliza la misma metodología anteriormente descrita obteniendo los siguientes resultados:

Aeronaves categoría Medium:

WAYPOINT	IAS PROMEDIO	CANT VUELOS	WAYPOINT	IAS PROMEDIO	CANT VUELOS
SEDPA/TEGEB/VUARI	175	10K	EL184	203	11K
KUDKA	154	21K	EL148	192	11K
NEGAG/ATTES	147	21K	EL130	184	11K
ROBAK	228	500	ARUKI	173	11K
EL129	202	500	EL069/EL076	158	21K
EL243	215	11K	LANDING	133	36K

Tabla 3.21 Velocidades promedio para aeronaves CAT Medium en waypoints analizados IAC.

Aeronaves categoría Heavy:

WAYPOINT	IAS PROMEDIO	WAYPOINT	IAS PROMEDIO
SEDPA/TEGEB/VUARI	174	EL184	223
KUDKA	169	EL148	210
NEGAG/ATTES	157	EL130	205
ROBAK	216	ARUKI	179
EL129	206	EL069/EL076	169
EL243	268	LANDING	150

Tabla 3.22 Velocidades promedio para aeronaves CAT Heavy en waypoints analizados IAC.

Velocidades durante los despegues desde SCEL.

Al igual que en los casos anteriores, para obtener las velocidades promedio en las salidas desde SCEL se realiza el mismo procedimiento, considerando todos los waypoints correspondientes. Las velocidades promedio para aeronaves categoría Medium son las siguientes:

WAYPOINT	IAS PROMEDIO	WAYPOINT	IAS PROMEDIO
DESPEGUE	166	TEPOK	267
EL022/EL024	193	TEMUS	269
EL106	248	TINGO	274
EL134	247	EL680	279
EL177	250	DILOK	260
EL370	274	GUVOL	271
DONTI	279	EL250	259
VAGOS	246	EL401	265
DESIT	246	ALBAL	274
GENPO	246	EL400	265
ANGOD	272	EL500	271
LOLAT	249	NEBEG	273
GELUS	274		

Tabla 3.23 Velocidades promedio aeronaves CAT Medium para todos los waypoints analizados SID.

Las velocidades promedio para aeronaves categoría Heavy son las siguientes:

WAYPOINT	IAS PROMEDIO	WAYPOINT	IAS PROMEDIO
DESPEGUE	180	TEPOK	350
EL022/EL024	200	TEMUS	354
EL106	275	TINGO	425
EL134	280	EL680	498
EL177	295	DILOK	500
EL370	365	GUVOL	500
DONTI	396	EL250	375
VAGOS	280	EL401	430
DESIT	280	ALBAL	495
GENPO	280	EL400	430
ANGOD	390	EL500	440
LOLAT	288	NEBEG	495
GELUS	274		

Tabla 3.24 Velocidades promedio aeronaves CAT Heavy para todos los waypoints analizados SID.

Tiempos de ocupación de pista CAT MEDIUM.

Una vez analizadas las velocidades durante la aproximación y despegue, se debe continuar con el cálculo de los tiempos de aproximación y uso de pista. Para obtener estos tiempos se utiliza la misma aplicación de Skywise y se agrega una herramienta adicional al análisis. Una vez definidas las zonas que serán evaluadas se debe realizar el mismo procedimiento utilizado para determinar las velocidades. Al obtener la lista de vuelos que pasaron por dichas zonas se debe utilizar una segunda herramienta que permite calcular los tiempos transcurridos entre cada una de las zonas que se decidieron evaluar.

Las zonas seleccionadas para obtener los tiempos en aproximación se ubican exclusivamente en la derrota de aproximación y calles de rodaje de la pista 17L ya que es la pista más utilizada para aterrizajes.



Imagen 3.20 Zonas evaluadas en aproximación a RWY 17L, SCEL.



Imagen 3.21 Zonas evaluadas TWYs RWY 17L, SCEL.

Una vez generadas las BBDD que contienen todos sobrevuelos obtenidos para cada zona evaluada, se deben ingresar en la segunda herramienta a utilizar, que tiene como objetivo, vincular cada sobrevuelo marcado con un vuelo ejecutado por Sky Airline, de tal manera que le permita al analista determinar el tiempo transcurrido, por vuelo, entre las distintas zonas evaluadas.

Para poder obtener los tiempos correspondientes a cada tramo analizado se crea un flujo que conecta las distintas zonas en base a las siguientes condiciones:

- Fecha de despegue debe ser antes que la fecha de ingreso a las zonas evaluadas.
- Fecha de aterrizaje debe ser después de las zonas evaluadas en aproximación y antes para las zonas evaluadas correspondientes a las TWYs.
- El registro de la aeronave debe ser el mismo.

Input tables: Flights, Swap, ZONA SNM

Match condition: rows that match | all conditions

And: actual_time_departure left < before FECHA right

And: landing_time left > after FECHA right

And: aircraft_registration left == is equal to Aircraft_Registration right

Se utiliza la DDBB con todos los vuelos realizados por Sky Airline.

Columnas obtenidas de la BBDD con todos los sobrevuelos realizados por zona.

Imagen 3.22 Lógicas utilizadas para unir las zonas evaluadas, ejemplo de la zona a 5 [NM] del umbral.

Una vez vinculadas todas las BBDD correspondientes a las zonas evaluadas, se continua con el desarrollo con el objetivo de obtener los tiempos transcurridos entre cada zona para finalizar con la creación de una nueva BBDD que será utilizada para analizar los resultados.

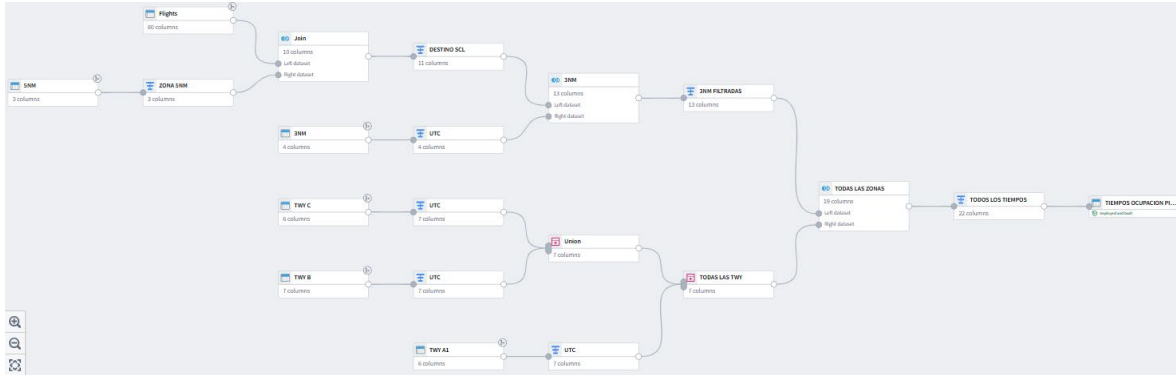


Imagen 3.23 Flujo creado con el fin de obtener los tiempos de aproximación y ocupación de pista.

Una vez creada la BBDD con los tiempos deseados, estos son analizados obteniendo los siguientes resultados:

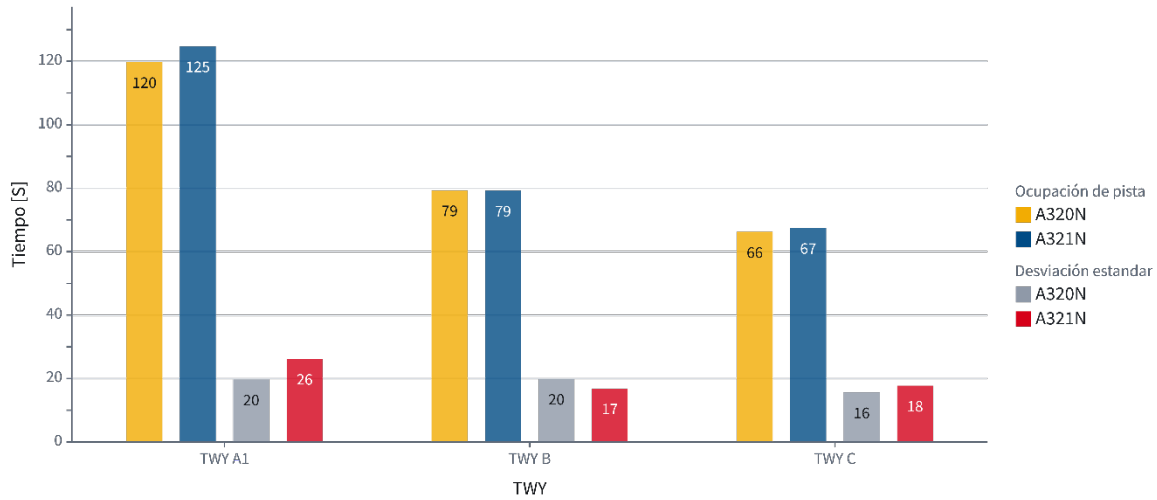


Gráfico 3.4 Tiempos de ocupación de pista promedio por TWY y tipo de aeronave.

Como se observa en el grafico anterior, la TWY C es la que permite el desalojo más rápido de la pista en comparación a la TWY B y TWY A1, sin embargo, el 78% de los vuelos analizados desalojaron por TWY B, lo que aumenta en 12 [S] el tiempo de ocupación de pista.

TWY	% DE USO
TWY A1	0.37%
TWY B	83.8%
TWY C	15.83%

Tabla 3.25 Porcentaje de uso para cada TWY de salida de RWY 17L, aeronave CAT Medium.

Respecto a las velocidades promedio al ingreso y salida de las TWY analizadas son las siguientes:

TWY	CANT VUELOS	VELOCIDAD INGRESO [KN]	VELOCIDAD INGRESO [KM]	VELOCIDAD SALIDA[KN]	VELOCIDAD SALIDA[KM]
TWY A1	81	11.2	20.8	9.7	17.9
TWY B	18150	21.9	40.5	10.2	19.0
TWY C	3428	23	42.7	13.1	24.2

Tabla 3.26 Velocidades promedio de ingreso y salida de cada TWY evaluada, aeronave CAT Medium.

La diferencia entre la velocidad de ingreso entre TWY C y TWY B es menor a un nudo, pese a que ambas TWY son consideradas de salida rápida lo que habilita a las aeronaves a abandonar la pista a un máximo de 93 [K/H] en condiciones de pista mojada. Un aumento en las velocidades de abandono de la pista puede generar una reducción en los tiempos de ocupación de pista por lo que durante el análisis final se evaluarán estos aumentos en las velocidades.

Respecto a los tiempos en aproximación, se evalúan los tiempos desde 5 [NM] del umbral de pista y desde 3 [NM] respectivamente. Los tiempos promedio son los siguientes:

PISTA	CANTIDAD DE VUELOS	TIEMPO DESDE 5 [NM], en [S]	TIEMPO DESDE 3 [NM], en [S]
RWY 17L	15400	138.2	88.0

Tabla 3.27 Tiempos de aproximación a RWY 17L desde 5 y 3 [NM] aeronave CAT Medium.

A continuación, la distribución de los tiempos de aproximación desde las 5 y 3 millas náuticas.

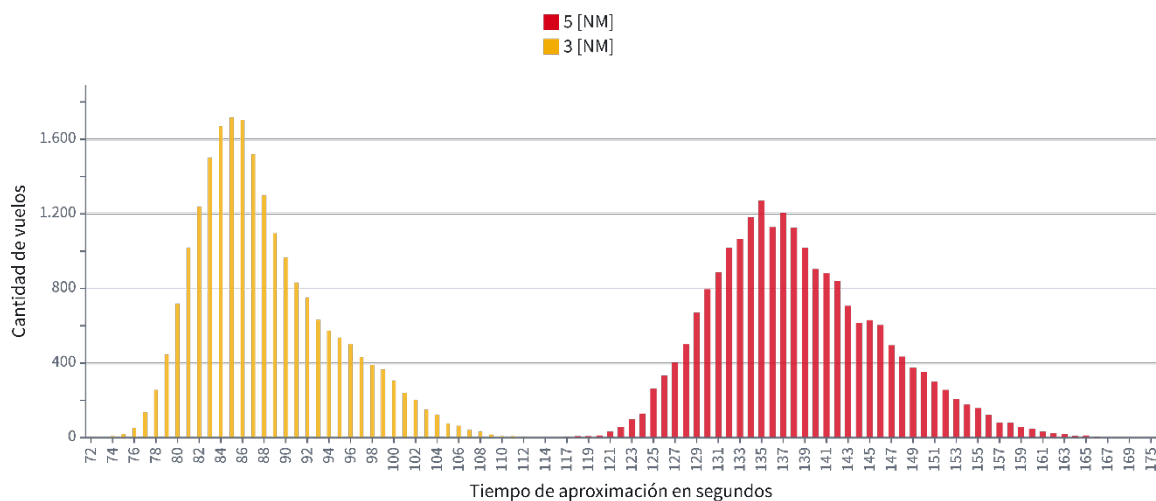


Gráfico 3.5 Distribución de los tiempos de aproximación desde las 5 y 3 [NM], aeronave CAT Medium.

Respecto a los tiempos de ocupación de pista en despegue, la lógica para obtener dichos tiempos es la misma que se utiliza para determinar los tiempos en la aproximación. En este caso, se evalúa únicamente la RWY 17R ya que es la pista utilizada en la mayoría de los despegues. Los resultados obtenidos son los siguientes:

PISTA	CANTIDAD DE VUELOS	TIEMPO USO PISTA [S]	TIEMPO DESPEGUE HASTA 2NM [S]
RWY 17R	36447	93.8	63.2

Tabla 3.28 Tiempos ocupación de pista en despegue y desde despegue hasta 2 [NM], aeronave CAT Medium.

La distribución de los tiempos de ocupación de pista en despegue tiene una variabilidad considerable a diferencia de los tiempos correspondientes a la distancia entre el despegue y la zona a 2 [NM] del umbral de RWY 35L. A continuación, la gráfica de esta distribución:

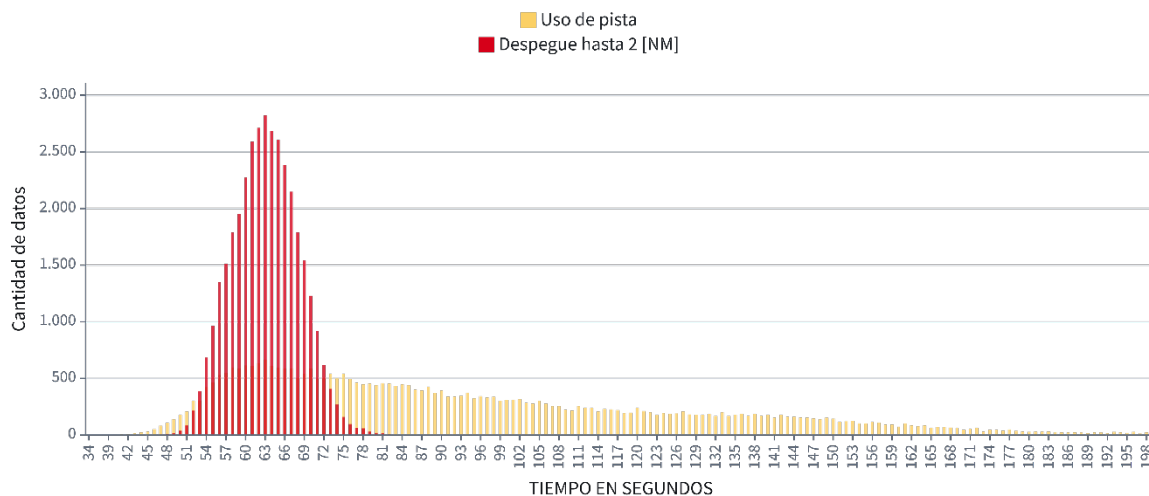


Gráfico 3.6 Distribución de los tiempos de despegue y sobrevuelo hasta 2 [NM] del umbral de RWY 35L.

Tiempos de ocupación de pista CAT HEAVY.

Para poder determinar los tiempos de ocupación de pista para aeronaves categoría Heavy se utiliza la misma metodología realizada para determinar las velocidades en los waypoint de cada procedimiento modelado. Una vez realizado el análisis los resultados son los siguientes:

PISTA	TIEMPO DESDE 5 [NM], en [S]	TIEMPO DESDE 3 [NM], en [S]
RWY 17L	119	72.6

Tabla 3.29 Tiempos de aproximación a RWY 17L desde 5 y 3 [NM] aeronave CAT Heavy.

TWY	TIEMPO OCUPACIÓN DE PISTA [S]	VELOCIDAD INGRESO [KN]	VELOCIDAD INGRESO [KM]
TWY B	49.8	20.0	37.0
TWY A1	92.7	11.2	20.7

Tabla 3.30 Tiempos ocupación de pista y velocidades de ingreso a TWY, aeronaves CAT Heavy.

Respecto a los tiempos de ocupación de pista durante el despegue, los resultados son los siguientes para aeronaves categoría Heavy:

PISTA	TIEMPO USO PISTA [S]	TIEMPO DESPEGUE HASTA 2NM [S]
RWY 17R	194.0	47.8

Tabla 3.31 Tiempos ocupación de pista en despegue y desde despegue hasta 2 [NM], aeronave CAT Heavy.

Una vez presentados los resultados correspondientes a los tiempos de ocupación de pista durante el despegue de aeronaves categorías Heavy, se completa el proceso de levantamiento de variables claves para la simulación mediante el uso de la bitácora operacional compartida por DGAC y el uso de Skywise para el análisis de variables para aeronaves categoría Medium.

3.4. Modelamiento de SCEL en Simmod Pro!.

Una vez recopiladas las variables necesarias para la simulación del escenario actual de SCEL, se debe continuar con el modelamiento del aeropuerto en Simmod Pro!. El modelamiento del aeropuerto en el software de simulación debe seguir con un orden secuencial en el relleno de información con el objetivo de considerar todas aquellas variables requeridas para poder realizar la simulación.

- DEGENERATE_AIRPORT
- AIRPORT
- GND_NODE
- GND_LINK
- RUNWAY
- RUNWAY_OPPOSITE_DIRECTIONS
- RUNWAY_LINK
- DEPARTURE_QUEUE
- AIRLINE
- GATE
- GATE_LINK_BLOCKED
- GATE_AIRLINE (not required, but recommended)
- PROBABILITY
- PROBABILITY_DISTRIBUTION
- AIR_AC_GROUP
- GND_AC_GROUP
- TAMPS_AC_GROUP
- TAMPS_AC_GROUP_GND_AC_GROUP
- AC_MODEL
- AC_MODEL_FAA
- AIR_LINK_TYPE
- AIR_AC_GROUP_AIR_LINK_TYPE
- AIR_AC_GROUP_SEPARATION
- AIRSPACE_NODE
- AIR_LINK
- ROUTE
- PRIMARY_ROUTE
- PLAN
- SETPLAN
- RUNWAY_AFFECTED
- INTERFACE_NODE
- RELATED_GROUP (via the Procedure Builder)
- PROCEDURES (via the Procedure Builder)
- PROC_AIRSPACE_AC_GROUP (via the Procedure Builder)
- FLIGHTS
- END_SIM

Imagen 3.24 Parámetros que deben tener información para poder realizar una simulación.

Por este motivo, el modelamiento se divide en 3 categorías principales que se describen a continuación:

- Lado aire del aeropuerto: Considera todos aquellos parámetros relacionados al lado aire del aeropuerto como puertas de embarque, calles de rodaje, pistas de aterrizaje y su dirección de uso, zonas de espera y categorías de aeronave en tierra.
- Espacio aéreo o TMA: Incluye todos los parámetros relacionados al espacio aéreo o TMA que conecta las aerovías con el aeropuerto analizado o viceversa. Dentro de estos parámetros se encuentran los waypoints, rutas, procedimientos estandarizados, categorías de aeronaves en el aire, separaciones horizontales y ubicación de las zonas de transición entre espacio aéreo y tierra.

- Otras variables: En esta categoría se considera toda aquella información que no tiene directa relación con el espacio aéreo o lado aire del aeropuerto. Algunos parámetros por considerar son las aerolíneas que operan en SCEL, modelos de aeronaves presentes en la simulación, todos los vuelos simulados y finalmente todas las probabilidades relacionadas a tiempos y distancias con su respectiva distribución.

Dentro de la aplicación existen varias pestañas donde se encuentran las diversas funciones disponibles en Simmod Pro!, las cuales se encuentran en la parte superior izquierda de la pantalla. Además, en la parte izquierda de la pantalla, se encuentra la barra de herramientas de Simmod que permite, entre otras cosas, moverse dentro del mapa y editar o agregar distintos parámetros.

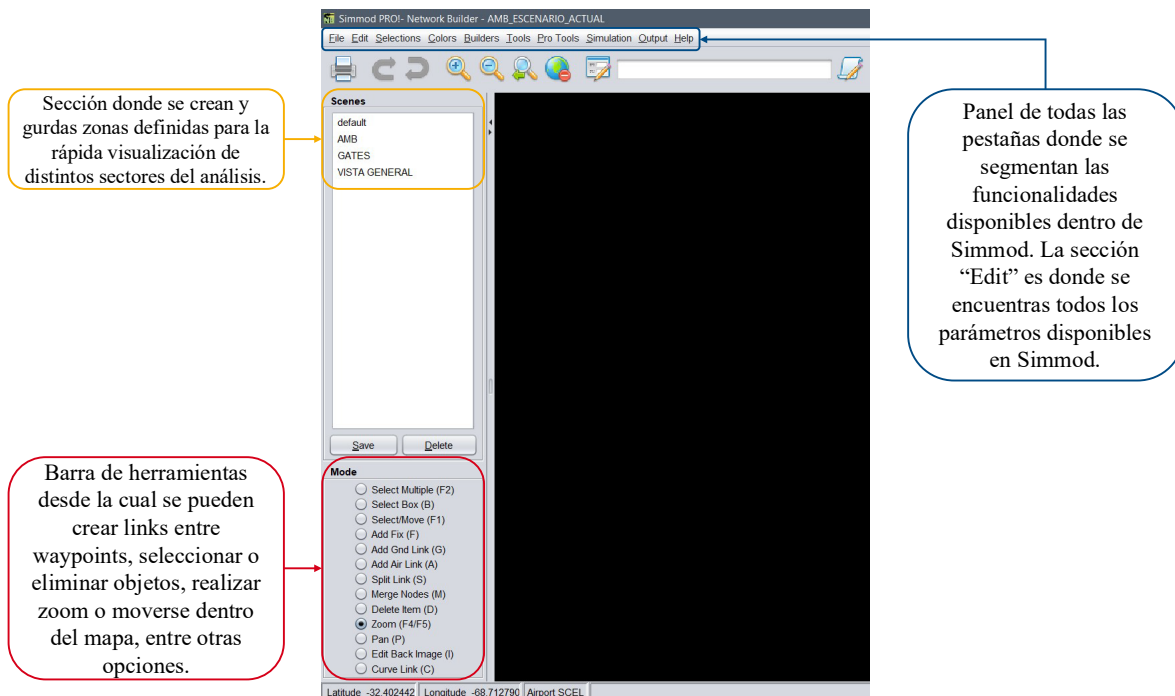


Imagen 3.25 Distribución de todas las secciones disponibles en Simmod Pro!.

Dentro de las pestañas disponibles, la sección "Edit" y "Builders" son aquellas que mayor relevancia tienen a la hora de realizar la modelación de un aeropuerto ya que contienen todos los parámetros disponibles en Simmod segmentados por el tipo de parámetro al cual está relacionado.

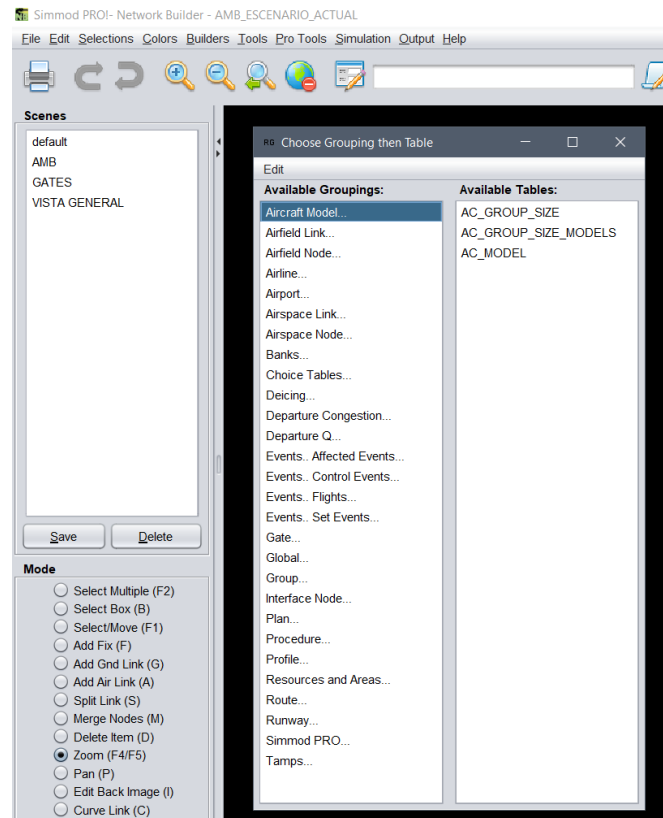


Imagen 3.26 Lista de todas las secciones de parámetros disponibles.

Una vez presentado el layout general de Simmod, se continua con la descripción más detallada del modelamiento correspondiente a cada categoría anteriormente descritas.

3.4.1. Parámetros lado aire del aeropuerto.

Ground Nodes:

Para iniciar con el modelamiento del escenario actual de SCEL se deben ingresar todas aquellas intersecciones de calles de rodaje y las respectivas ubicaciones de las puertas de embarque y desembarque de pasajeros. Este parámetro tiene el nombre de Ground Node y requiere la siguiente información para poder ser modelado:

- GRN_ID: Nombre del punto creado.
- APT_ID: Aeropuerto al cual pertenece el punto modelado⁴⁸.
- X_COORD: Coordenada longitudinal, en grados decimales, del punto modelado.
- Y_COORD: Coordenada latitudinal, en grados decimales, del punto creado.
- ALTITUDE: Altitud del punto creado (Para puntos en tierra, altitud del aeropuerto)

⁴⁸ Revisar sección “Airport” para más información sobre los aeropuertos.

Una vez ingresados todos los valores anteriormente descritos, se podrá visualizar en el mapa de Simmod Pro!. En el caso de SCEL, se crean 452 puntos en tierra, obtenidos desde la herramienta QGIS, para poder crear todas las calles de rodaje habilitadas en SCEL

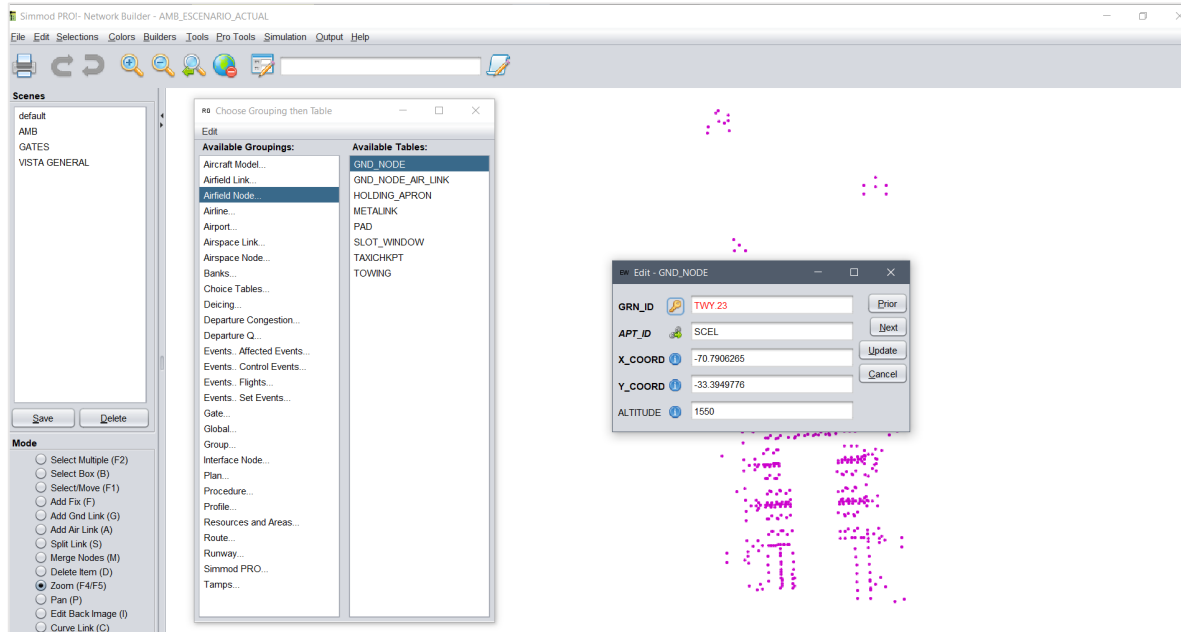


Imagen 3.27 Ejemplo de la creación de un punto terrestre, TWY.23.

Una vez creado los puntos en tierra, se puede continuar con la creación de las calles de rodaje y puertas de embarque.

Ground Link:

Para la creación de un link, ya sea en aire o tierra, es necesario tener al menos 2 puntos creados para poder ser unidos por dicho link. Los parámetros requeridos para poder crear un link son los siguientes:

- GRL_ID: Nombre asignado al link en tierra.
- GRN_INITIAL_ID: Punto en tierra desde el cual comienza el link.
- GRN_FINAL_ID: Punto en tierra en el cual finaliza en link.
- LENGTH_FLOAT: Longitud de dicho link, se rellena de manera automática al unir dos puntos existentes.
- HEADING: Rumbo del link, se rellena solo al crear el link.
- A_D_FLAG: Link utilizado para arribos (1), despegues (-1) o ambos (0).
- MAX_AC_ON_LINK: Cantidad máxima de aeronaves permitidas en el link.

- **PASSING_FLAG**: Permitido o no adelantar en el link. Default es 0.
 - 0: No permitido.
 - 1: Permitido solo en la misma dirección.
 - 2: Permitido en ambas direcciones.
 - 3: Permitido en direcciones opuestas.
- **HI_SPEED_EXIT_TF**: Link de calle de rodaje normal (0) o de salida rápida (1).
- **DIRECTION_USED**: Sentido en el cual debe utilizarse el link. Default es 0.
 - -1: Flujo permitido solo desde punto de llegada a punto de inicio
 - 0: Ambos sentidos permitidos.
 - 1: Flujo permitido solo desde el punto de inicio al punto final.
- **TAXI_SPEED**: Velocidad de rodaje.
- **PRS_SPOOLUP_DELAY_ID_USED**: Distribución tiempos de retraso en link.

Una vez completado cada campo anteriormente descrito⁴⁹, se puede crear el link para poder modelar una calle de rodaje. Se crean un total de 612 links en tierra para el correcto modelamiento de las calles de rodaje de SCEL⁵⁰.

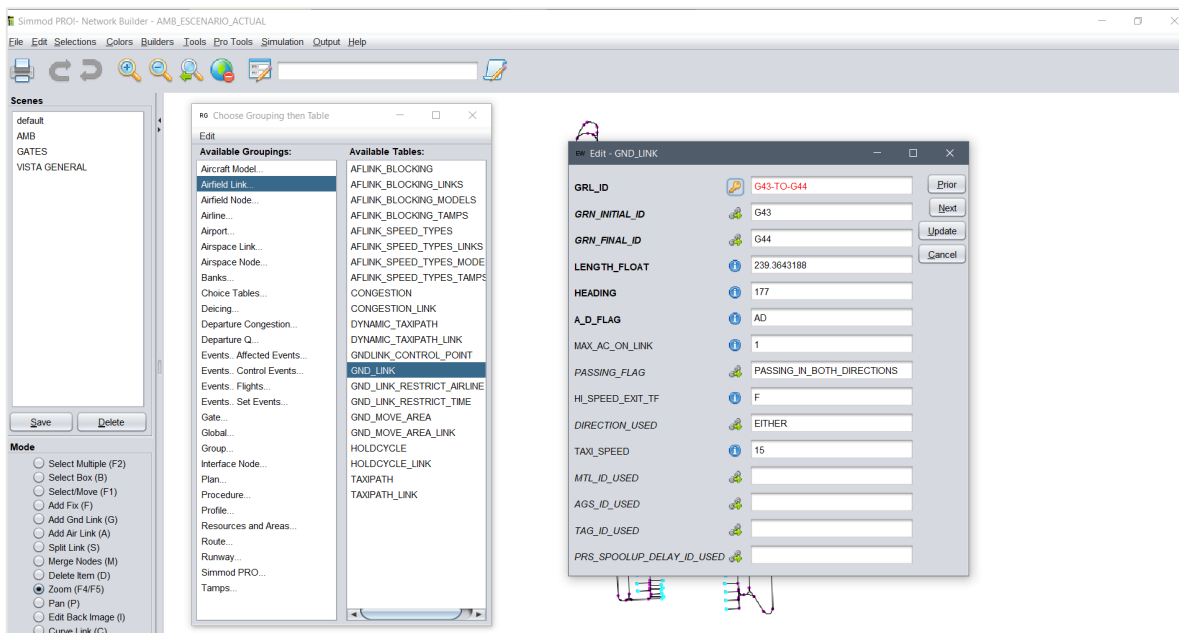


Imagen 3.28 Ejemplo de la creación de un link terrestre, G43-TO-G44.

⁴⁹ Los campos descritos en la lista son solo aquellos que es necesario rellenar para crear un link. Existen otros campos opcionales al momento de crear un link.

⁵⁰ Calles de rodaje obtenidas desde (AIP-Chile VOL II AMDT N° 99, 2025, pág. 696), e intersecciones obtenidas desde QGIS.

Una vez creados los links en tierra, se puede continuar con la creación de las puertas de embarque.

Puertas de embarque:

Para la creación de las puertas de embarque se puede utilizar la herramienta “Gate Builders”, disponible en la pestaña “Builders”, que entrega una interfaz más completa. Los parámetros necesarios⁵¹ a la hora de crear una puerta de embarque son los siguientes:

- Gate Name: Nombre de la puerta de embarque.
- Ground Node: Punto en tierra donde se ubica la puerta de embarque.
- Blocked Link List: Links terrestres bloqueados al utilizar una puerta de embarque.
- Airlines: Aerolíneas que tienen permitido utilizar dicha puerta de embarque.

Con estos parámetros rellenos se puede crear una puerta de embarque. Se crean un total de 111 puertas de embarque en SCEL⁵².

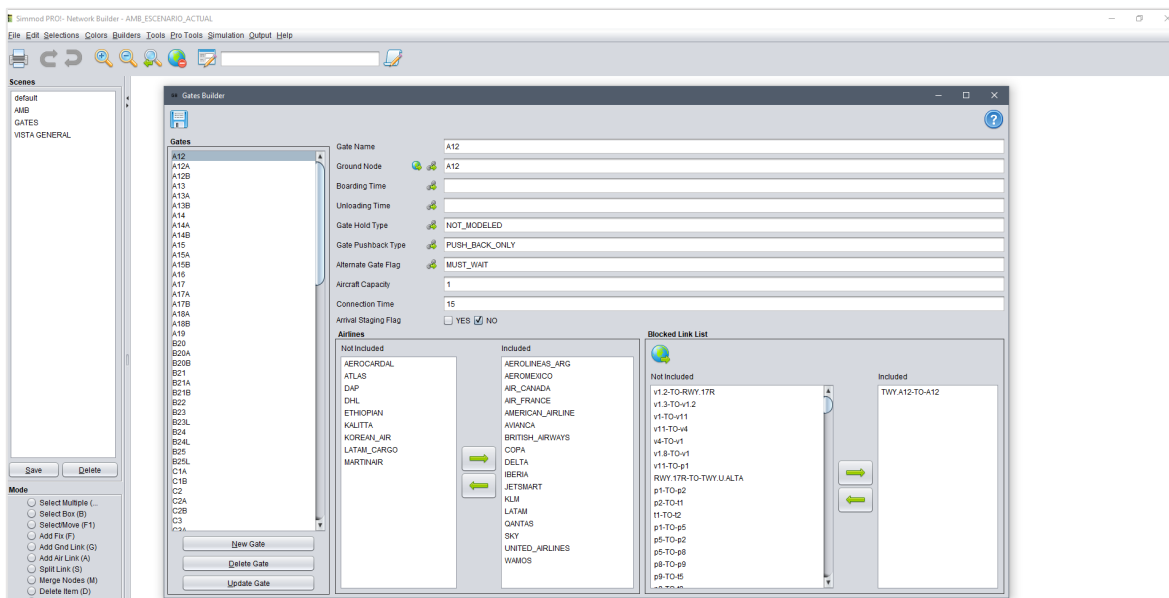


Imagen 3.29 Ejemplo de la creación de una puerta de embarque, A12.

⁵¹ Existen más parámetros disponibles que no son indispensables a la hora de modelar una puerta de embarque.

⁵² Información obtenida desde (AIP-Chile Vol. I: AD 2 SCEL – Aeródromo Arturo Merino Benítez (AMDT 63), 2025, págs. 21-23)

Runway:

Para la creación de las pistas de aterrizaje es necesario que existan los puntos y links en tierra que le darán forma a todas las pistas a crear. Para crear las pistas de aterrizaje se utiliza la herramienta “Runway Builder” disponible en la pestaña “Builders”.

Se deben considerar los siguientes parámetros para modelar una pista de aterrizaje:

- Primary Direction Runway Name: Nombre de la pista en sentido principal.
- Opposite Direction Runway Name: Nombre de la pista en sentido opuesto.
- Primary Threshold Displacement: Desplazamiento del umbral pista principal.
- Opposite Threshold Displacement: Desplazamiento umbral pista sentido opuesto.
- Links: Segmentos terrestres que conforman la pista de aterrizaje. Para crear la pista de aterrizaje, se deben seleccionar los links desde el mapa y utilizar la opción “Links From Map to List” dentro de la herramienta “Runway Builder”.

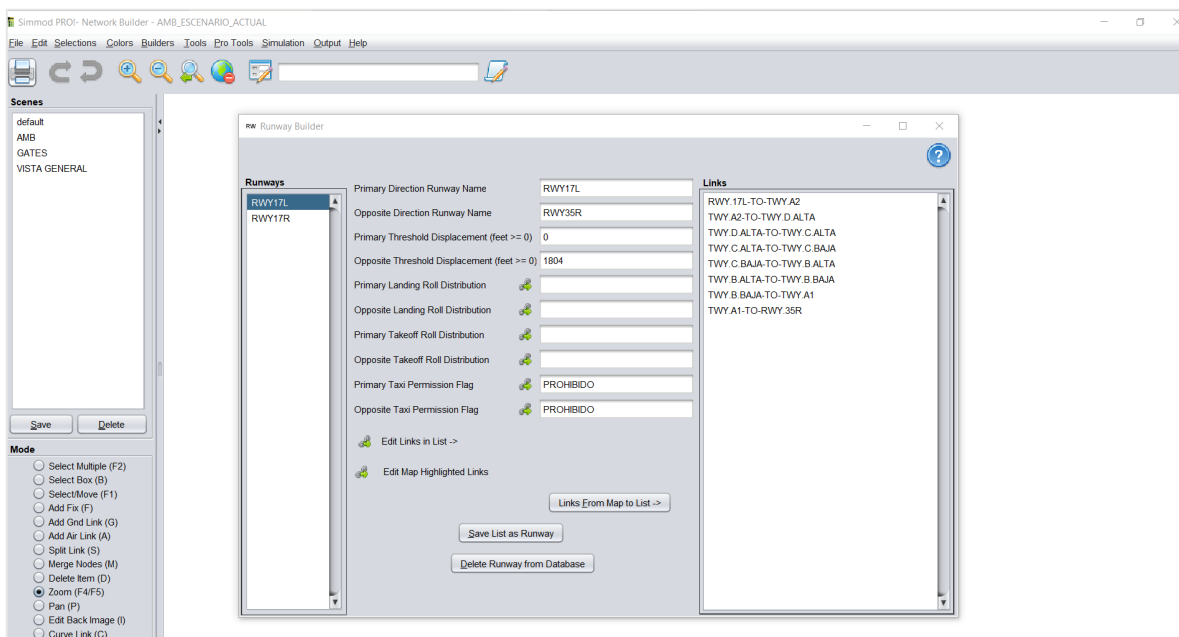


Imagen 3.30 Creación de una pista de aterrizaje, caso ejemplo RWY 17L.

Como se observa en la **Imagen 3.30**, existen campos que no son indispensables para la creación de una pista de aterrizaje como las distribuciones de aterrizajes y despegues por sentido principal u opuesto.

Se crean 2 pistas de aterrizaje que conectan los umbrales de la pista principal y de aquella en sentido opuesto (AIP-Chile Vol. II: Tabla de coordenadas – SCEL (Amend. 99), 2025)

Zonas de espera:

Dentro de los parámetros que deben ser definidos en la sección de zona terrestre son los puntos de espera donde la aeronave debe esperar a que se desocupe la pista para poder despegar. Para la creación de estos puntos de espera se utiliza la herramienta “Departure Queue Builder” disponible en la sección “Builders”. Los inputs necesarios son los siguientes:

- Queue Name: Nombre de la zona de espera.
- Node: Punto terrestre donde se ubica la zona de espera.
- Threshold: Cantidad de aeronaves en espera que se debe alcanzar para forzar un despegue mediante la separación de aeronaves en aproximación.
- Wait Threshold: Similar a punto anterior, define el tiempo que debe esperar una aeronave antes de que se realice un intento de despegue.
- Min Queue Switch: Numero a alcanzar para que se comience a redirigir el flujo a otra zona de espera.
- Max Queue Switch: Si se alcanza esta cantidad de aeronaves, no se aceptarán más aeronaves en esa zona de espera.
- Max Queue Size: De alcanzarse este número de aeronaves en la zona y en camino a esta, se desvían las aeronaves a una zona de espera remota.
- Passing Depth: Cantidad de aeronaves que se pueden adelantar en la zona de espera.
- Route List: Rutas⁵³ que utilizan esta zona de espera para los despegues.

Se crean un total de 4 zonas de espera, 2 para cada pista principal en uso (RWY 17L, RWY 17R) obtenidas desde QGIS..

⁵³ En la sección “Routes” se detalla la creación de rutas.

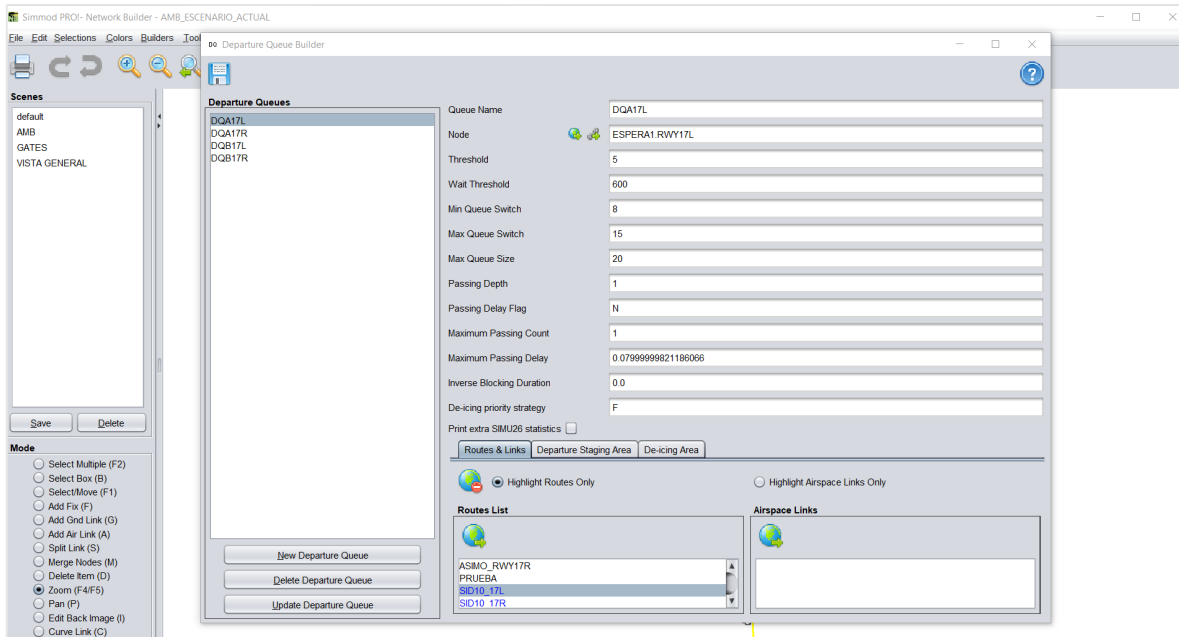


Imagen 3.31 Creación de zonas de espera, zona de espera RWY 17L de referencia

Aircraft Ground Groups Builder:

Con el fin de poder asignar atributos a aeronaves con características similares durante su taxeo, es necesario crear los grupos de aeronaves en tierra. Se utilizan las categorías Heavy, Large, Small y General Aviation. En el caso de SCEL solo se consideran categoría Large y Heavy. Los parámetros necesarios son los siguientes:

- Aircraft Ground Name: Nombre del grupo.
- Initial Separation: Separación, en segundos, durante el inicio de taxeo.
- Conflict Separation: Tiempo que se utiliza cuando se resuelven conflictos.
- Probability Distribution: Diferentes probabilidades disponibles para cada parámetro⁵⁴.
- Aircraft Models: Modelos de aeronaves que conforman el grupo en cuestión.

⁵⁴ Distribuciones probabilísticas creadas en sección “Probability y Probability Distribution”.

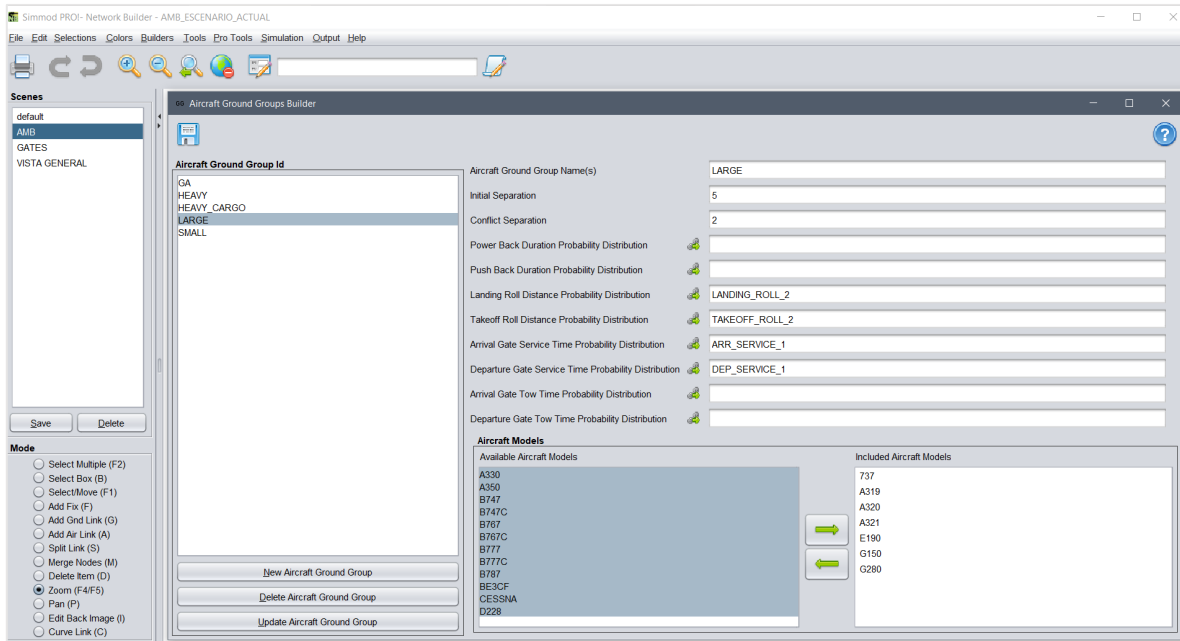


Imagen 3.32 Herramienta utilizada para crear grupos de aeronaves en tierra, ejemplo Large en SCFL.

Una vez finalizada la modelación de todos los parámetros terrestres necesarios para el correcto funcionamiento de la simulación, se puede continuar con el modelamiento de los parámetros aéreos.

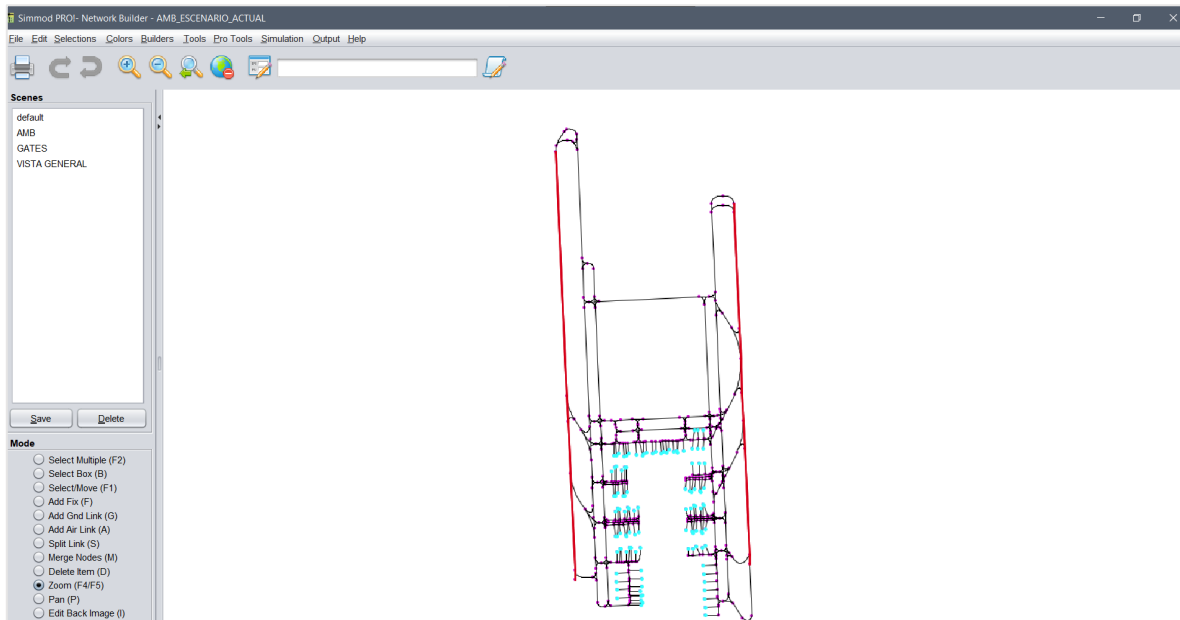


Imagen 3.33 representación de todos los parámetros terrestres modelados, aeropuerto SCFL.

3.4.2. Parámetros espacio aéreo.

Una vez ingresados todos los parámetros terrestres necesarios para el correcto funcionamiento de la simulación, se debe continuar con los parámetros correspondientes al espacio aéreo de SCEL. Al igual que en los parámetros terrestres, se parte por los waypoints.

Airspace Node (Waypoints):

Para la creación de los distintos waypoints es importante tener en consideración la información recopilada en el capítulo 3.3.1 que será utilizada para modelar los waypoints en Simmod. Las variables necesarias son las siguientes:

- ASN_ID: Nombre del waypoint a modelar.
- ALTITUDE: Altitud del waypoint.
- CONTROL_START: Lógica utilizada para el flujo que aproxima a dicho Waypoint:
 - QFIFO: Ordena a las aeronaves en orden de llegada.
 - Speed fit: Utiliza la velocidad de la aeronave para determinar si puede posicionarse por delante de su posición correspondiente.
 - Multi fit: Utiliza la velocidad de la aeronave aproximando al waypoint, la de la aeronave que lo precede y de la que lo sigue para ordenar el flujo.
- ARRIVAL_STRAT_FLAG: 1 si se debe respetar separación horizontal entre todas las aeronaves que pasan por el waypoint, 0 si se respeta solo entre aeronaves que comparten ruta de llegada o salida de dicho waypoint.
- INTRAIL_SEP_DIST: Separación horizontal, en NM, que se debe respetar entre las aeronaves que sobrevuelan dicho waypoint.
- MAX_HELD_AC: Cantidad de aeronaves que puede albergar cada waypoint.
- HOLDING_STRAT: Tipo de holding a realizar:
 - 1: Holding si en el siguiente waypoint hay una aeronave haciendo holding.
 - 2: Holding si el holding en el siguiente waypoint está lleno.
 - 3: Holding si la cantidad de aeronaves en el siguiente waypoint o en camino a este en su máximo permitido.
 - 4: Holding si la cantidad de aeronaves aproximando al siguiente waypoint supera la capacidad de dicho waypoint.
- STT_ID_USED: Tipo de holding a realizar en el waypoint. 0 equivale a que no hay.
- X_COORD: Coordenadas longitudinales del waypoint a modelar.

- Y_COORD: Coordenadas latitudinales del waypoint a modelar.

Una vez rellenados todos los campos recién descritos, se puede modelar el waypoint.

Para SCEL, se modelan un total de 80 waypoint correspondientes a 13 procedimientos estandarizados de salida (SID), llegada (STAR) o aproximación (IAC)⁵⁵.

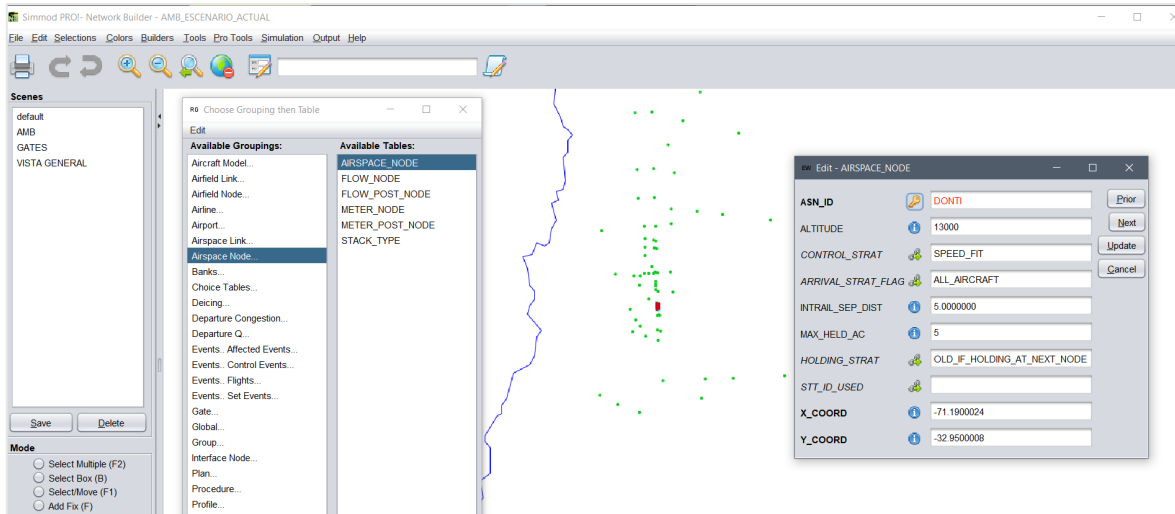


Imagen 3.34 Sección donde se modelan los waypoints, waypoint DONTI utilizado de ejemplo.

Air Link:

Una vez modelados los waypoint y recopilada la información respecto a las STAR, SID e IAC a modelar, definidas en el capítulo 3.3.1, se deben modelar los links aéreos que le darán forma a los procedimientos seleccionados. Los parámetros necesarios son los siguientes:

- ASL_ID: Nombre del link a modelar.
- ASN_INITIAL_ID: Waypoint del cual parte el link.
- ASN_FINAL_ID: Waypoint en el que finaliza el link.
- LENGTH_FLOAT: Distancia, en NM, que tiene el link. Se llena automáticamente.
- HEADING: Rumbo del link. Se rellena automáticamente.
- ALT_ID_USED: Tipo de link aéreo al cual pertenece.
- SCT_ID_USED: Sector, si existen, al cual pertenece el link.
- WDA_IS_USED: Set de vientos, si existen, que afecta al link.
- OVERTAKE_FLAG: Regla de adelantamiento, está permitido o no.

⁵⁵ Información recopilada desde (AIP-Chile Vol. II: Tabla de coordenadas – SCEL (Amend. 99), 2025)

- WAKE_TURB_FLAG: Se debe determinar si se prohíbe o no que un avión SMALL siga a una aeronave CAT HEAVY.
- MAX_AC_ON_LINK: Cantidad máxima de aeronaves que pueden estar en un link.
- MAX_DELAY_ABSORBED: Tiempo, en minutos, de retraso generado en el link.

Una vez rellenados todos estos campos, se pueden modelar los links. Para escenario de SCEL se modelan un total de 85 links que conforman los 13 procedimientos a modelar.

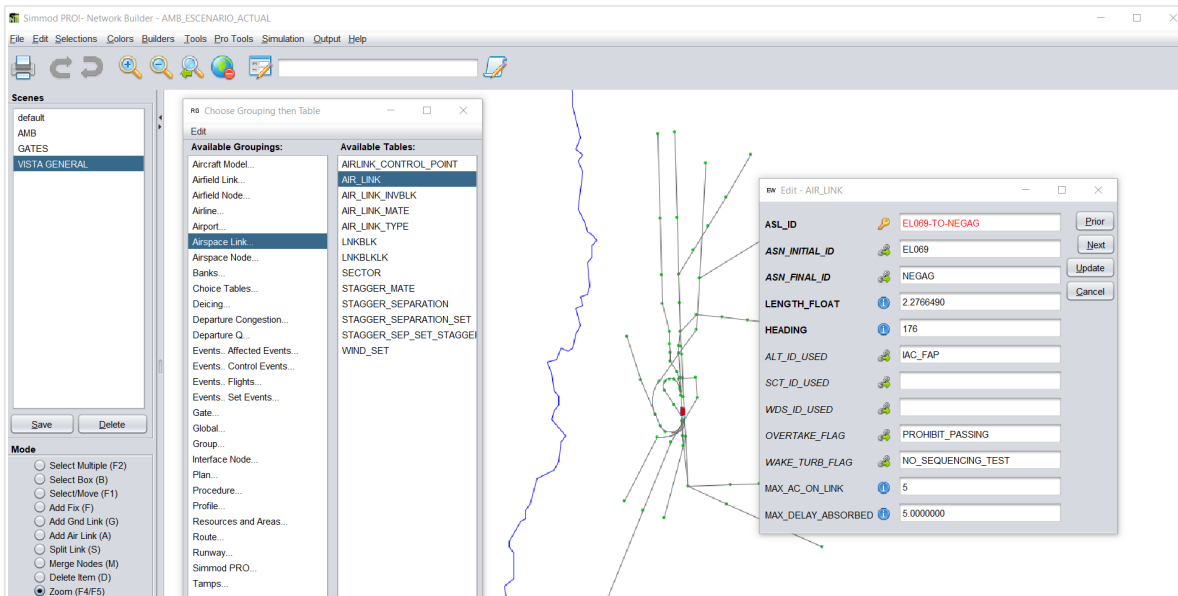


Imagen 3.35 Sección donde se modelan los links aéreos, caso de ejemplo link ELO69-TO-NEGAG.

Routes:

Al momento de generar los vuelos a simular es necesario asignarles una ruta a seguir para salir o llegar al aeropuerto, equivalente a los procedimientos SID, STAR e IAC. Para la creación de estas rutas se debe utilizar la herramienta “Route Builder” disponible en la pestaña “Builders”. Los parámetros necesarios para crear rutas son los siguientes:

- Route Name: Nombre de la ruta. Se utilizan números de procedimiento.
- Links: Todos los links aéreos que conforman la ruta en cuestión. Para crear la ruta se deben seleccionar los links directamente desde el mapa y gracias a la opción “Links From Map To List” asignarlos a la ruta que se está creando.

De acuerdo con la información presentada en la **Tabla 3.16**, se modelan un total de 13 procedimientos divididos en 8 SID y 5 STAR que conectan con las 4 IAC seleccionadas.

Debido a que algunos procedimientos pueden ser utilizados desde o hacia ambas pistas, se terminan creando un total de 25 rutas en Simmod Pro!.

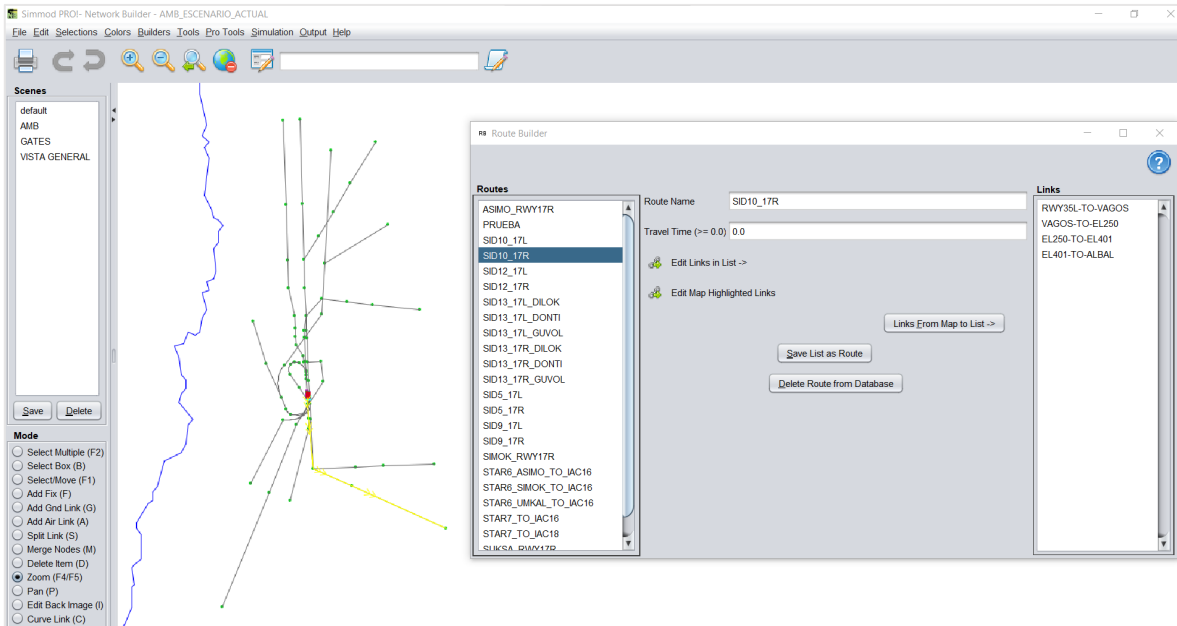


Imagen 3.36 Sección donde se crean las rutas dentro de Simmod. SID10 desde RWY17R utilizada de ejemplo.

Air Link Type:

Para alivianar la carga de trabajo, existe la posibilidad de agrupar aquellos links q comparten información respecto a las velocidades máximas, medias y mínimas mediante el uso de este parámetro que está relacionado con la creación de **Air Link**. El único parámetro necesario es el nombre de dicho grupo de links ya que el resto de información se completa en el siguiente capítulo. Se crean 10 tipos de links que incluyen 3 para las STAR, 4 para las IAC y 3 para las SID. Esta división se debe a la diferencia de velocidades en cada zona de vuelo cuyos valores son los siguientes:

CATEGORIA		HEAVY	MEDIUM
IAS DEFINIDA (KN)	STAR INICIO	405	270
	STAR MEDIO	335	250
	STAR FINAL	270	230
	IAC IAF	225	210
	IAC IF	195	180
	IAC FAP	165	165
	LANDING	150	140
	DESPEGUE	190	180
	SID CLIMB	240	220
	SID	290	240

Tabla 3.32 Velocidades definidas para cada sección definida en el análisis.

Air Aircraft group Builder:

Al igual que los grupos de aeronaves en tierra, es necesario crear grupos de aeronaves respecto a su comportamiento en el aire. Este parámetro es fundamental para agregar profundidad al comportamiento de las aeronaves en el espacio aéreo al considerar los siguientes parámetros necesarios para su implementación:

- Aircraft Group: Nombre del grupo que se desea crear.
- Minimum Ceiling & Runway Visual Range [Ft]: Mínimos de visibilidad para cada grupo aéreo creado.
- Intrail Separation Probability Distributions: Factor de aumento o disminución de la separación horizontal entre grupos de aeronave.
- Included Aircraft Model: Lista de las aeronaves incluidas en el grupo creado.
- Defined Link Type: Lista de todos los **Air Link Type** creados para el análisis. Se debe ingresar la velocidad máxima permitida en cada tipo de link, además de la velocidad media y velocidad mínima.
- Defined Stack Types: Tipos de holding disponibles en el escenario. Establecen los tiempos de holding y velocidad.
- Separation from Groups: Separación horizontal por estela turbulenta o mínima legal entre los grupos creados. Se debe ingresar separaciones en sobrevuelo y para aproximación final.

Al igual que en el caso de los grupos terrestres, se crean solo 2 grupos principales, Medium y Heavy, ya que representan el 98% de las operaciones. En esta sección se deben definir las separaciones horizontales entre aeronaves en función de su categoría y si corresponde o no considerar separaciones adicionales por concepto de estela turbulenta. Para determinar las separaciones por estela turbulenta se deben tener en consideración dos categorizaciones de aeronaves diferentes que influyen en la separación que debe existir entre cada par de aeronaves. La primera categorización, definida por la OACI, divide las aeronaves en 4 categorías en función de su peso máximo de despegue como se muestra en la **Tabla 3.5** y será la metodología de categorización que se utilizará en el modelamiento del escenario actual de SCEL, la cual considera las siguientes separaciones por estela turbulenta:

		Aeronave que sigue.			
		SUPER	HEAVY	MEDIUM	LIGHT
Aeronave que lidera.	SUPER	-	5 NM	7 NM	8 NM
	HEAVY	-	4 NM	5 NM	6 NM
	MEDIUM	-	-	-	5 NM
	LIGHT	-	-	-	-

Tabla 3.33 Separación por estela turbulenta entre categorías.⁵⁶

Como se observa en la **Tabla 3.33**, cuando una aeronave categoría MEDIUM sigue a una aeronave categoría HEAVY, debe mantener una separación de 5NM por motivos de estela turbulenta. Para aquellos casos donde no aplica esta separación, se considera una separación de 4NM para la modelación del escenario actual, debido a que en la actualidad las separaciones entre aeronaves no son inferiores a 4NM.

Para la modelación de los escenarios optimizados de SCEL, se utiliza la otra metodología disponible para segmentar y separar aeronaves en aproximación. La información correspondiente a dichas mejoras se detalla con profundidad en el **Capítulo 3.5.2**

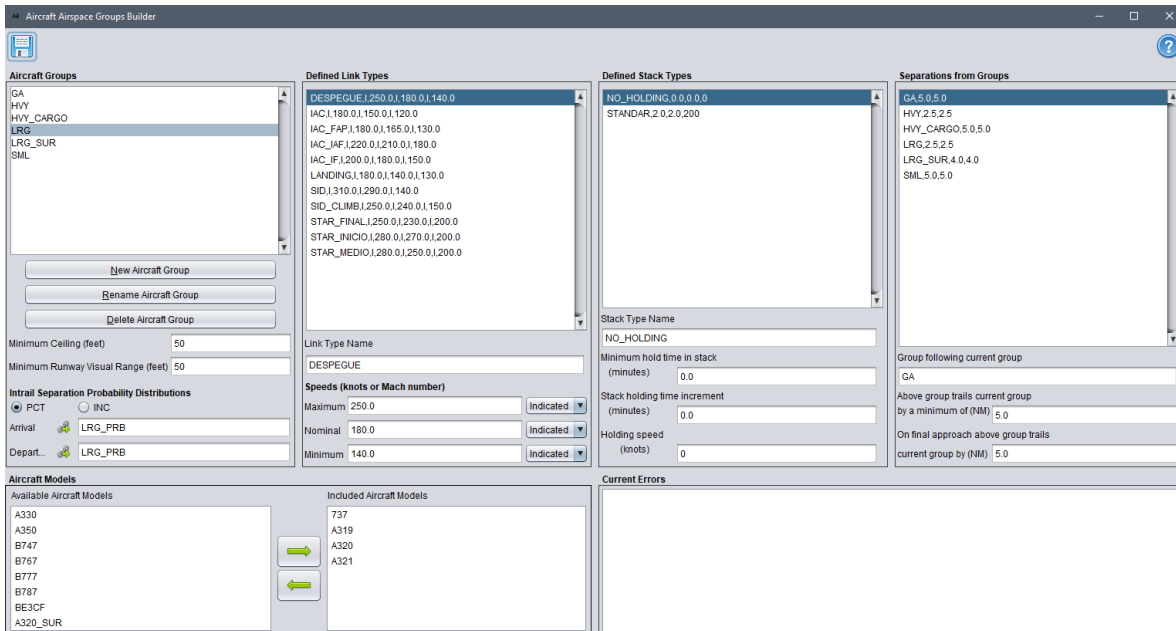


Imagen 3.37 Herramienta utilizada para la creación de grupos aéreos. Grupo MEDIUM presentado de ejemplo.

⁵⁶ Pares de categorías de aeronaves con simbología “-” no requieren separación horizontal por concepto de estela turbulenta.

Interface Node:

Para permitir el flujo entre el espacio aéreo y la pista, se deben crear puntos de transición que facilitan la conexión entre los aviones que aproximan o despegan, con los procedimientos SID o IAC. Estos puntos de transición se encuentran en los umbrales de cada pista donde los aviones despegando ingresan al espacio aéreo y los aviones aterrizando realizan touch down.

Para crear estos puntos se deben considerar los siguientes parámetros:

- ASN_ID: Waypoint seleccionado como punto de transición. Ubicado en el umbral de cada una de las 4 pistas.
- APT_ID: Aeropuerto al cual corresponde el punto de transición.
- NODE_GAP: Intervalo de tiempo que tiene como objetivo permitir el cruce de aeronaves por la pista a la cual pertenece este punto de transición. En SCEL no aplica.
- SPRD_LIST: Incremento en la separación horizontal de las aeronaves aproximando a dicha pista con el objetivo de permitir un despegue pendiente.
- SPRD_LST_TYPE: Tipo de separación aplicada en parámetro SPRD_LIST. Se puede considerar un aumento porcentual (PCT), número de [NM] de separación absoluta (ABS) e incremento de [NM] en la separación (INC).

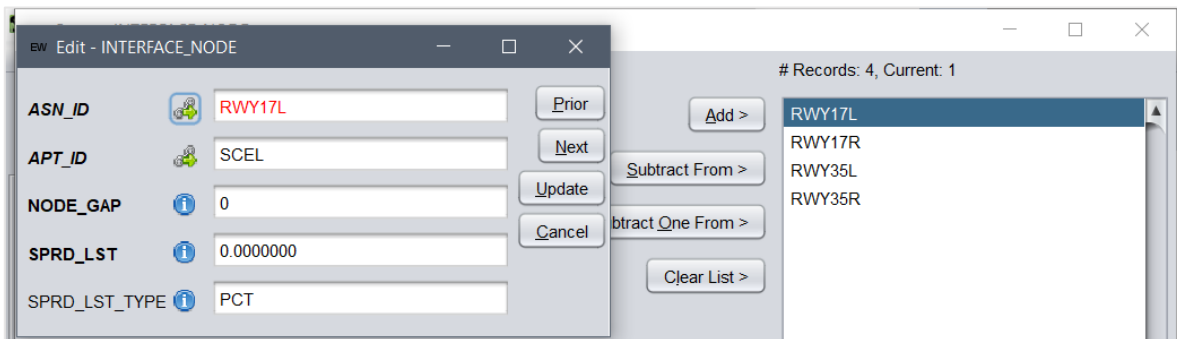


Imagen 3.38 Herramienta utilizada para crear puntos de transición. Punto RWY17L presentado como ejemplo.

Procedures:

Este parámetro tiene como objetivo definir tiempos y distancias entre aeronaves que aproximan y aquellas que despegan, siempre y cuando lo hagan a la misma pista o a pistas dependientes. Para el aeropuerto SCEL se consideran pistas independientes⁵⁷ por lo que se generan procedimientos separados para RWY17L y RWY17R. Los parámetros por considerar son los siguientes:

⁵⁷ De acuerdo con lo definido en el capítulo “Análisis cumplimiento normativa nacional e internacional”.

- Related Group: Se deben crear grupos que abarcan todos aquellos procedimientos que dependen entre sí. Para SCEL se crea el grupo para RWY17L y RWY17R.
- Procedure Name: Se le debe asignar un nombre al procedimiento.
- Procedure: Se debe seleccionar el tipo de procedimiento, de despegue o aterrizaje:

Despegue:

- Se debe seleccionar si el avión que despegue previamente debe estar en el aire para poder despegar.
- La aeronave debe esperar en la zona de espera hasta que la pista este libre.

Aterrizajes:

- Se debe seleccionar si un avión en pista genera una aproximación frustrada.
- Se debe seleccionar a que distancia del umbral se genera el touch down.
- Runway: Se debe seleccionar para que pista aplica el procedimiento.
- Proc RWY Start/End Node: Se debe seleccionar el punto en el cual parte y finaliza el procedimiento. Se consideran la misma ubicación que el punto de transición.
- Departure Queue: Para procedimientos de despegue, se debe seleccionar zona de espera desde la que parte el procedimiento.
- Interface Node: Se debe seleccionar el punto donde se pasa de aire a tierra o viceversa.
- Aircraft Group: Grupo de aeronaves a los cuales aplica el procedimiento.
- Separations: En la pestaña de separaciones se deben seleccionar las distancias en [NM] y/o el tiempo en [S] que debe existir entre cada procedimiento perteneciente al mismo grupo.

Debido a la independencia entre las pistas de SCEL, se consideran procedimientos independientes para cada pista, separados por despegue y aterrizaje. Para los aterrizajes se crea un procedimiento único para cada pista pero para los despegues se crea un procedimiento por categoría de aeronave para cada pista de despegue. Esta distinción se debe a que las separaciones entre despegues dependen de la categoría de la aeronave que lidera y aquella que la sigue o en función de la ruta utilizada. Para la modelación del escenario actual de SCEL se considera una separación de 120 [S] entre aeronaves que comparten trayectoria y 60 [S] entre vuelos que tienen una divergencia de 45° entre sus trayectorias. En el caso de los aterrizajes, se establece que la distancia desde el umbral de pista a la cual debe encontrarse una aeronave aproximando para bloquear la pista es de 4 NM. Al igual que la separación por

estela turbulenta, estos valores serán modificados para el análisis del escenario optimizado de SCEL, que se desarrolla a profundidad en el **Capítulo 3.5.2**.

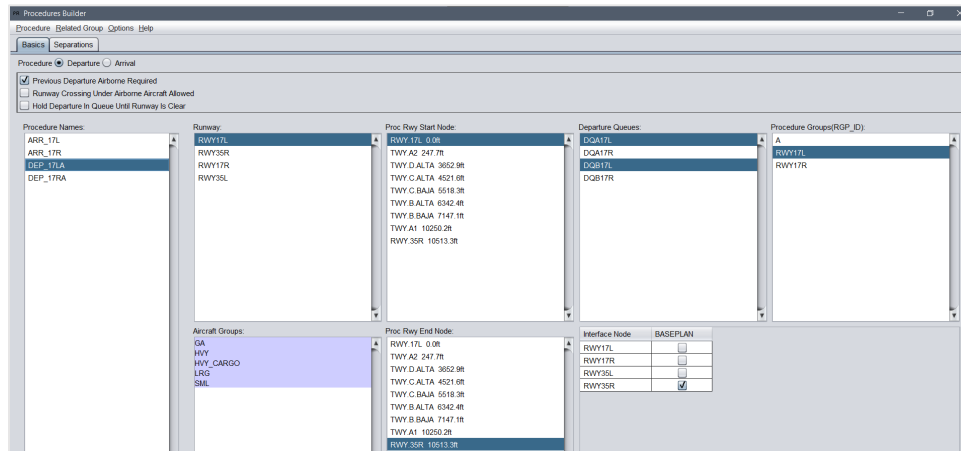


Imagen 3.39 Herramienta utilizada para crear procedimientos. Proc DEP_17LA utilizado de ejemplo.

3.4.3. Otras variables.

Dentro de esta sección se describen todos los parámetros que no pertenecen exclusivamente a la sección aire o tierra ya que rigen de manera más general el escenario modelado. Además de los parámetros descritos en los capítulos 3.4.1 y 3.4.2, en este capítulo se describen todos aquellos faltantes para poder realizar la simulación.

Airport:

Dentro de un escenario en Simmod Pro! es posible tener más de un aeropuerto modelado para analizar distintos parámetros deseados. Dentro de Simmod existe el parámetro DEGENERATE_AIRPORT donde se debe ingresar únicamente el nombre o código de algún aeropuerto desde el cual o hacia el cual se desea operar y que además funciona como input para el parámetro más relevante en esta categoría, el cual es AIRPORT.

Este parámetro AIRPORT es el que se considera a la hora de crear **Ground Nodes** ya que se debe referenciar a que aeropuerto corresponden. Los parámetros necesarios para crear la variable AIRPORT son los siguientes:

- APT_ID: Se debe seleccionar el aeropuerto a analizar dentro de todos los creados.
- ELEVATION: Elevación, en pies, del aeropuerto.
- DESCRIPTION: Se puede ingresar una pequeña descripción de ser necesario.



Debido a que el flujo será ordenado en base a la ruta utilizada, no es necesario generar toda la red de aeropuertos desde o hacia la cual se vuela desde SCEL por lo que solo se ingresan 4 aeropuertos además de SCEL, cada uno ubicado en una distinta dirección geográfica.

Airline:

En esta sección se crean todas las aerolíneas que se deseen modelar en el escenario simulado. Al igual que en el caso de los aeropuertos, no es indispensable para la simulación que se consideren todas las aerolíneas que operan desde o hacia SCEL, por lo que en este caso solo se consideran las 3 aerolíneas principales que son LATAM, SKY Airline y JetSmart.

Los parámetros necesarios para crear estas aerolíneas son el nombre y el tipo de aerolínea que es, comercial, civil o carguera. Este parámetro puede ser utilizado para condicionar algunos parámetros anteriormente mencionados como lo podría ser en el caso de las puertas de embarque, las cuales pueden ser bloqueadas exclusivamente para determinadas aerolíneas de ser necesario.

Probability y Probability Distribution:

Esta sección es importante para varios parámetros anteriormente descritos. El parámetro de probabilidades y sus respectivas distribuciones es útil para definir la variabilidad que puede existir en distintas variables consideradas en la modelación de SCEL como por ejemplo los tiempos de embarque o desembarque o distancia ocupada durante aterrizaje. Los parámetros necesarios para crear estas distribuciones probabilísticas son los siguientes:

- **Distribution Name:** Nombre de la distribución probabilística.
- **Units:** Unidad utilizada para medir la distribución probabilística. Se pueden considerar Pies [Ft], horas, minutos, factor multiplicativo, cantidad o segundos.
- **Probability:** Sección donde se debe ingresar la probabilidad de que ocurra determinado suceso (0.0 a 1.0). La lógica de funcionamiento es acumulativa y se debe partir por el menor valor e ir aumentando escalonadamente, es decir, si la probabilidad de que el tiempo de embarque sea de 10 minutos es de un 0.2 (20%) y que sea menor a 20 y mayor a 10 es de un 20% también, la probabilidad de que el tiempo de embarque es igual o menor a 20 minutos es de 40% y así continuamente hasta llegar a una probabilidad acumulada de 100%.
- **Associated Value:** Valor asignado a cada probabilidad descrita anteriormente y en función de la unidad elegida.

Para el caso del escenario de SCEL, se consideran probabilidades de embarque, desembarque y distancia de rodaje en el aterrizaje y despegue. Debido a que solo se simula el movimiento de aeronaves, se deja en 0 el tiempo de embarque y desembarque para no agregar una variabilidad extra que no está relacionada con la capacidad operacional. La distribución de la distancia de aterrizaje está sujeta a la cantidad del uso de las calles de rodaje, es decir, para aeronaves CAT MEDIUM se configuran las distancias de aterrizaje con el objetivo de que el 80% de los desalajes sean realizados por TWY B como ocurre en la actualidad y el 20% restante sean por TWY C. Para el caso de aeronaves HEAVY se establece que el 80% de los desalajes sean por TWY B, un 10% por TWY A1 y el 10% restante por TWY A.

Para el caso de las distancias de rodaje en el despegue, se definen distancias que abarcan la mayoría de la pista con el fin de bloquear la pista durante todo el rodaje y sobrevuelo de la pista. Para aeronaves categoría MEDIUM, el 70% utiliza a lo más 9.800 [FT] y el 30%

restante utiliza a lo más 10.200 [FT]. Para aeronaves categoría HEAVY se utilizan, a lo más, 11.800 [FT].

Tamps:

Equivalente al parámetro **Aircraft Ground Groups Builder**, es utilizado para definir las características de aterrizaje, despegue y uso de pista para todos los grupos de aeronaves definidos. Los parámetros necesarios son el nombre del parámetro y el grupo terrestre que se desea modelar. Para la simulación de SCEL solo se consideran los grupos Medium y Heavy.

AC_MODEL:

Esta sección está dedicada a la creación de los distintos modelos de aeronaves que serán utilizados en la simulación. Los parámetros necesarios para crear los modelos deseados son los siguientes:

- **ACM_ID:** Nombre del modelo de aeronave que se desea modelar.
- **ASG_ID:** Grupo aéreo al cual pertenece el modelo de aeronave.
- **GRG_ID:** Grupo terrestre al cual pertenece el modelo de aeronave modelado.
- **DESCRIPTION:** De ser necesario, se puede ingresar una pequeña descripción.

Para el caso de esta simulación se consideran 3 modelos de aeronave que son el Airbus A320 y A321 y el Boeing 787 ya que representan el 91% de las operaciones. Los modelos Airbus pertenecen a la categoría Medium en aire y tierra y el B787 pertenece a la categoría Heavy en aire y tierra también.

PLAN:

Este parámetro tiene la misión de definir la estructura utilizada en el escenario simulado. De no rellenar este parámetro, se utiliza el plan definido por defecto que no permite transiciones entre rutas o configuración de uso de las pistas. Para el caso de SCEL, se crea un único plan que considera la dirección de los despegues y aterrizajes de norte a sur utilizando las RWY17L y RWY17R.

FLIGHTS:

Esta sección es donde se crean los vuelos a simular. Para el caso de esta simulación los vuelos son creados mediante las herramientas de **MULTIARRIVAL** y **MULTIDEPARTURE** que permiten replicar un vuelo un número determinado de veces en un periodo de tiempo definido. Los parámetros requeridos para utilizar estas funcionalidades son los siguientes:

- **Parámetros en común:**

FLT_ID: Nombre de los despegues o llegadas múltiples.

TIME_NM: Hora de la simulación en la que comienzan las salidas o llegadas múltiples.

ALN_IS_USED: Aerolínea seleccionada para operar estos vuelos.

NUM_FLIGHTS: Cantidad de vuelos a simular.

ACM_ID: Modelo de aeronave.

RTE_ID: Ruta que debe volar la aeronave ya sea de salida o llegada.

TXP_ID_USED: Calle de rodaje utilizada por el vuelo, ya sea para desocupar o llegar a la pista.

GTE_ID_USED: Puerta desde la cual o hacia la cual llega el vuelo.

TIME_INTERVAL: Periodo de tiempo en el que se deben insertar a la simulación la cantidad de vuelos definidos.

APT_DEST:ID: Aeropuerto de destino.

APT_ORIG_ID: Aeropuerto de origen.

- Parámetros exclusivos MULTI_DEPARTURE:

SLOT_DIST_PRS_ID_USED: Probabilidad de superar el tiempo definido para cada slot.

SLOT_WINDOW_ID_USED: Define los tiempos mínimos y máximos de un slot.

Para todos los escenarios modelados y analizados se consideran variados vuelos que llegan y salen de SCEL, por lo que durante la presentación de los resultados en el **Capítulo 3.5** se detallaran los vuelos simulados para cada escenario analizado.

END_SIM:

Es el ultimo parámetro que debe ser configurado y como lo dice el nombre, este parámetro es el encargado de definir el momento en el que finaliza la simulación del escenario modelado. los parámetros necesarios son:

- ESM_ID: Nombre del parámetro.
- TIME_NM: Hora de la simulación en la cual finaliza la simulación.

3.5. Análisis y presentación de los resultados.

Este capítulo tiene como fin presentar todos los resultados obtenidos para los variados escenarios analizados.

Para un mejor entendimiento de los resultados que serán presentados a continuación, se debe explicar la metodología y lógica utilizada para cada uno de ellos.

Para el escenario actual se consideran 2 lógicas de flujo y uso de pistas, y para el escenario optimizado se agrega una tercera. A continuación, las lógicas utilizadas por escenario simulado:

- Uso segregado de pistas: Se busca obtener la capacidad que tiene el aeropuerto si se utiliza una pista exclusivamente para aterrizajes y otra para despegues.
- Distribución del flujo en hora punta: Se ordena el flujo y uso de pistas con el fin de modelar las horas punta del 2024.
- Uso mixto: Exclusivo para escenario optimizado. Se analiza la capacidad de SCCL considerando un uso mixto para cada pista. Se realizan despegues y aterrizajes de manera equitativa en cada pista. Debido a que en la actualidad no se realizan despegues simultáneos independientes, esta lógica solo se considera para el escenario optimizado.

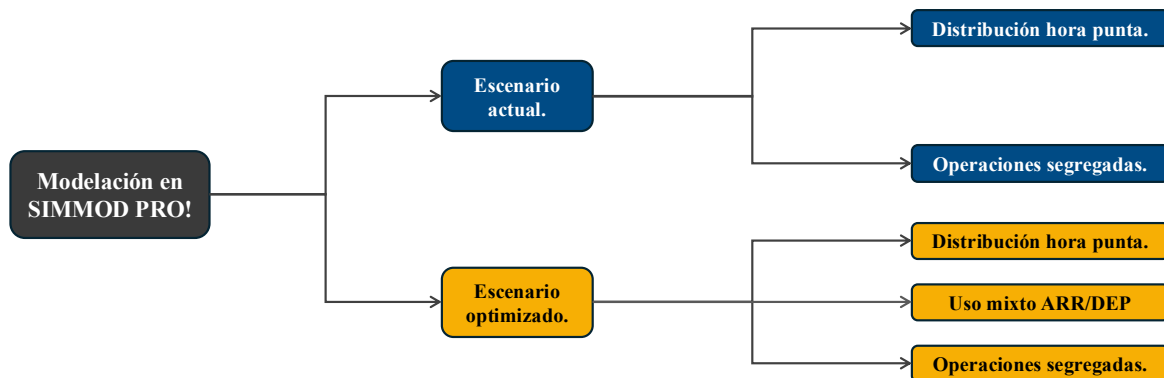


Imagen 3.40 Flujo de cada análisis realizado y presentado.

Para cada una de las lógicas considerada en esta memoria, se realizan al menos 10 simulaciones, de 50 iteraciones cada una, considerando distintos niveles de demanda hasta llegar a la máxima capacidad operacional de dicha lógica.

3.5.1. Resultados escenario actual

Para comenzar con la presentación de los resultados se evalúa el escenario actual de SCEL. A continuación se presentan aquellas variables que comparten los 2 escenarios analizados:

- Separaciones horizontales: Se define como separación horizontal mínima 4NM entre aquellos pares de aeronaves que no requieren una separación por motivos de estela turbulenta (Ver **Tabla 3.33**).
- Separación entre despegues: Se establece una separación mínima de 120 [S] entre aeronaves que comparten misma trayectoria y una separación de 60 [S] entre aeronaves que tienen trayectorias divergentes en 45°.
- Bloqueo pista de despegue: Una aeronave aproximando bloquea la pista para posibles despegues al encontrarse a 4 NM o menos del umbral.
- Distribuciones probabilísticas: Se define que el 80% de los vuelos realizados por aeronaves categoría MEDIUM o HEAVY desalojan RWY 17L por TWY B y RWY 17R por TWY U (Ver **Probability** y **Probability Distribution** para información completa).

Una vez presentadas las variables en común se continua con la presentación de los resultados para cada lógica de flujo analizada.

Operaciones segregadas:

Al analizar la capacidad operacional de SCEL considerando operaciones segregadas se obtienen los siguientes resultados:

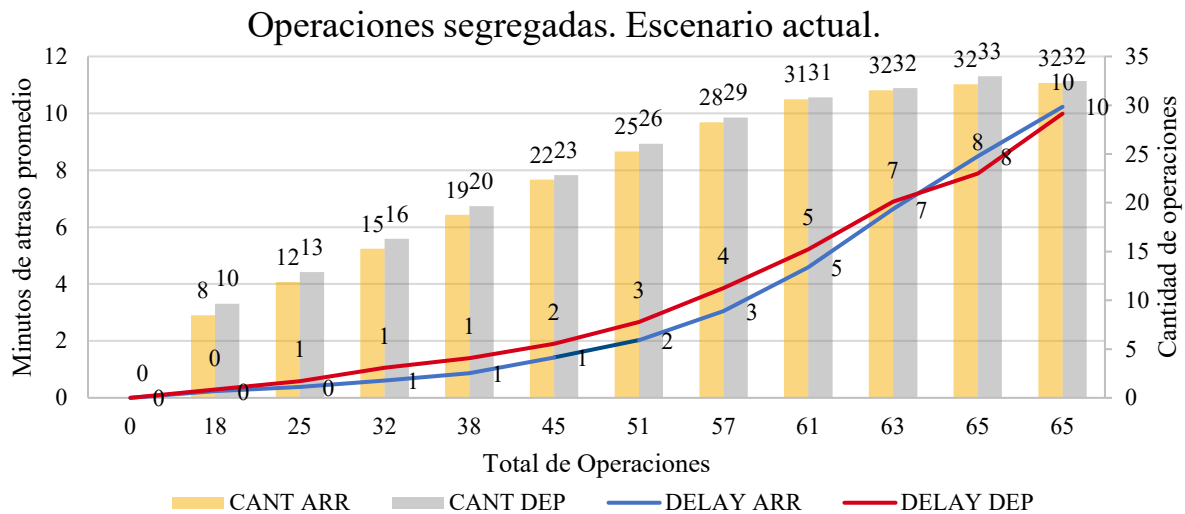


Gráfico 3.7 Cantidad de operación y atraso promedio para operaciones segregadas, escenario actual.

ARR	DEP	ARR DELAY	DEP DELAY	TOTAL OPS/HR
0	0	0	0	0
8.48	9.66	0.24	0.29	18.14
11.88	12.9	0.38	0.59	24.78
15.28	16.3	0.61	1.06	31.58
18.76	19.66	0.87	1.39	38.42
22.36	22.82	1.42	1.9	45.18
25.26	26.06	2.03	2.67	51.32
28.26	28.74	3.05	3.86	57
30.6	30.82	4.59	5.22	61.42
31.54	31.76	6.64	6.89	63.3
32.14	32.96	8.49	7.89	65.1
32.28	32.48	10.23	9.99	64.76

Tabla 3.34 Resultados obtenidos al considerar operaciones segregadas en el escenario actual.

Como se observa en el **Gráfico 3.7** y **Tabla 3.34**, al alcanzar el umbral de demora aceptada, que son 10 minutos, se obtienen alrededor de las 65 operaciones por hora, teniendo una relación 1:1 entre despegues y aterrizajes. Al momento de simular este escenario se modelan vuelos provenientes del norte (49%), este (30%) y sur (21%), de los cuales, el 86% son realizados por aeronaves categoría MEDIUM y el 14% restante son realizados por aeronaves categoría HEAVY. En el caso de los despegues, se divide en 2 salidas, aquellas que se dirigen hacia el norte (50%) y aquellas que se dirigen hacia el sur o este (50%) ya que comparten trayectoria. Debido a los tiempos de separación utilizado entre despegues, la categoría de la aeronave no influye en la capacidad operacional.

Los resultados de la simulación entregaron como resultado un máximo de **65 operaciones por hora** considerando un 86% de los aterrizajes realizados por aeronaves MEDIUM y el 14% restante por aeronaves HEAVY. Para el caso de los despegues, la distribución fue 50% despegues hacia el norte y 50% despegues hacia el sur, tal cual fueron modelados los vuelos.

Operaciones mixtas hora punta:

Para este análisis se considera la distribución de despegues y aterrizajes correspondientes a las 2 horas con mayor cantidad de operaciones durante el 2024. En este escenario se consideran aproximaciones simultaneas independientes a diferencia de las salidas que son dependientes. Esto se traduce en que los aterrizajes representan el 60% de las operaciones realizadas mientras el 40% restante son despegues. La distribución de las operaciones y categoría de aeronaves son las siguientes:

DESPEGUES		ATERRIZAJES		
RWY17L	RWY17R	RWY17L		RWY17R
CAT HEAVY/MEDIUM		HEAVY	MEDIUM	MEDIUM
6%	94%	6%	56%	38%

Tabla 3.35 Distribución del flujo modelado en base a las horas punta durante 2024, SCEL.

Una vez determinado y modelado el flujo se obtienen los siguientes resultados:

Operaciones mixtas hora punta. Escenario actual.

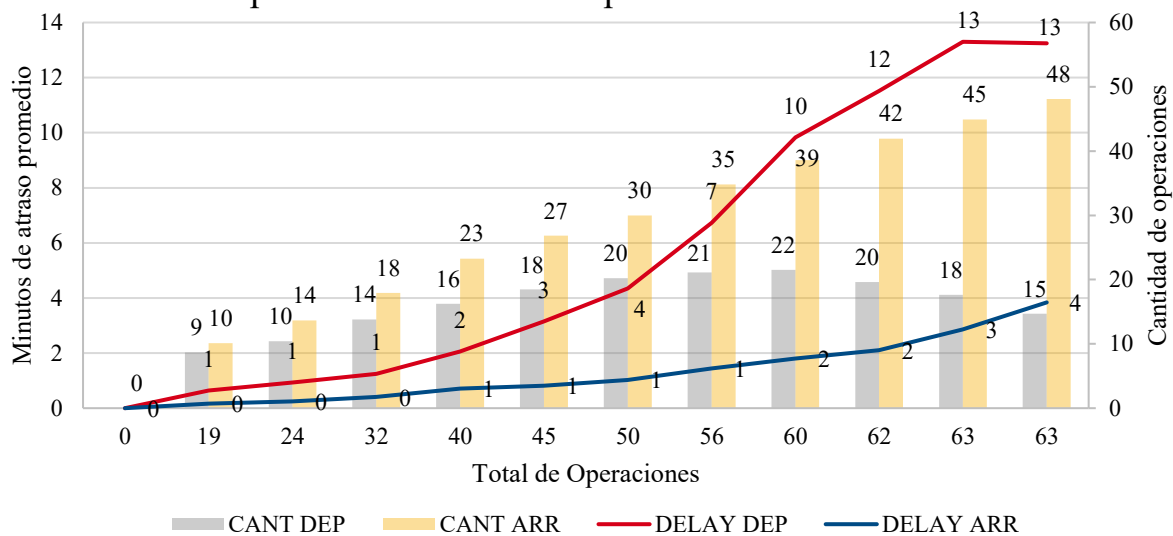


Gráfico 3.8 Cantidad de operación y atraso promedio para operaciones mixtas hora punta, escenario actual.



ARR	DEP	ARR DELAY	DEP DELAY	TOTAL OPS/HR
0	0	0	0	0
10.14	8.66	0.17	0.64	18.8
13.64	10.42	0.25	0.93	24.06
17.92	13.8	0.41	1.24	31.72
23.28	16.24	0.71	2.06	39.52
26.82	18.46	0.82	3.15	45.28
29.98	20.24	1.03	4.35	50.22
34.82	21.1	1.44	6.73	55.92
38.58	21.52	1.8	9.83	60.1
41.94	19.64	2.11	11.51	61.58
44.92	17.64	2.86	13.3	62.56
48.08	14.7	3.84	13.24	62.78

Tabla 3.36 Resultados obtenidos considerando uso mixto, escenario actual.

Como se observa en el **Gráfico 3.8** y **Tabla 3.36**, bajo la distribución existente en las horas punta durante 2024, la capacidad máxima es de aproximadamente **60 operaciones por hora** alcanzando los 10 minutos de demora en los despegues y solo 2 minutos de demora en los aterrizajes. Se observa además, que el aumento en los aterrizajes por ambas pistas limita la cantidad de despegues realizables por hora, generando una reducción en la cantidad (Columna “DEP”) y un aumento en la demora (Columna “DEP DELAY”). Al considerar las 60 operaciones por hora se obtiene que el 64% de las operaciones son aterrizajes y el 36% restante despegues, valores que difieren del escenario modelado que cumplía con una relación 60:40.

3.5.2. Resultados escenario optimizado

Una vez presentados los resultados obtenidos para el escenario actual de SCCL, se continua con los resultados obtenidos al optimizar las siguientes variables:

1. **Separaciones horizontales:** Una de las limitaciones más importantes respecto a la capacidad que tiene un aeropuerto, es la separación mínima que debe existir entre aeronaves durante la aproximación. En los escenarios analizados anteriormente se definieron las separaciones horizontales dispuestas por la OACI considerando solo 4 categorías de aeronaves (Ver **Tabla 3.33**) y una separación horizontal mínima de 4NM para aquellos pares de aeronaves que no requieren una separación adicional. Para los siguientes escenarios analizados, las separaciones horizontales por estela turbulenta se modifican debido a un cambio en la categorización de aeronaves y sus respectivas separaciones. De acuerdo con la información dispuesta en el DOC 4444⁵⁸ de la OACI y la orden JO 7110.126B⁵⁹ de la FAA, se reagrupan las aeronaves en función de su peso máximo de despegue y su extensión de ala a ala. Una vez reagrupadas las aeronaves que operan en SCCL, se establecen, al igual que en el escenario anterior, 2 grupos que serán evaluados los cuales son el grupo B, equivalente a aeronaves HEAVY y grupo F⁶⁰, equivalente a categoría MEDIUM. A continuación, las separaciones horizontales con nuevos grupos de aeronaves:

		AERONAVE QUE SIGUE								
		A	B	C	D	E	F	G	H	I
AERONAVE QUE LIDERA	A		5NM	6NM	6NM	7NM	7NM	7NM	8NM	8NM
	B		3NM	4NM	4NM	5NM	5NM	5NM	5NM	6NM
	C					3.5NM	3.5NM	3,5NM	5NM	6NM
	D		3NM	4NM	4NM	5NM	5NM	5NM	6NM	6NM
	E									4NM
	F						-			4NM
	G									
	H									
	I									

Tabla 3.37 Separaciones por estela turbulenta entre categorías de aeronaves. Escenario optimizado.

⁵⁸ (Doc 4444, Procedures for Air Navigation Services (PANS) - Air Traffic Management, 2016, pág. 62)

⁵⁹ (JO 7110.126B - Consolidated Wake Turbulence (CWT), 2021)

⁶⁰ Categoría equivalente a CAT D en documento (Doc 4444, Procedures for Air Navigation Services (PANS) - Air Traffic Management, 2016).

Al comparar las nuevas separaciones horizontales con aquellas establecidas en la **Tabla 3.33**, se observa una disminución de 1NM entre aeronaves pesadas y se conserva la separación existente cuando lidera una aeronave pesada y la sigue una aeronave pequeña. De acuerdo con los requisitos establecidos en la orden de la FAA⁶¹, se define como separación mínima entre aeronaves, que no requieren separación adicional por estela turbulenta, 2.5NM teniendo en consideración los siguientes requisitos:

- Ocupación promedio de pista igual o menor a 50 [S].
 - Certified Tower Radar Display (CTRD) operativo.
2. **Separación entre despegues:** De igual manera que en las separaciones horizontales, las separaciones entre despegues también sufren modificaciones con el fin de optimizar el flujo en SCEL. De acuerdo con lo descrito en el DOC 4444⁶², se consideran las siguientes separaciones entre las nuevas categorías de aeronaves:
 - 120 [S] de separación cuando una aeronave categoría F (Medium) sigue a una aeronave categoría B (Heavy).
 - No se requiere separación por estela turbulenta entre aeronaves de la misma categoría por lo que se aplica el mínimo de 60 [S] de separación.
 3. **Bloqueo de pista:** Se establece que un avión aproximando bloquee la pista respectiva al encontrarse a 2.5NM del umbral o a 60 [S] del aterrizaje. Estos valores van de la mano con una optimización en los tiempos de ocupación de pista durante el despegue que deben ser menores a 60 [S].
 4. **Distribuciones probabilísticas:** Se modifican las distancias de aterrizaje y despegue y se establece un máximo de 50 [S] para aterrizajes forzando el 100% de los desalojos por TWY C o la futura calle de rodaje de salida rápida TWY R para aeronaves CAT F, y el 100% de desalojos por TWY B o TWY U para aeronaves CAT B. Respecto a los despegues, se definen 60[S] como tiempo máximo de ocupación de pista para ambas categorías de aeronaves.

Una vez presentadas las modificaciones realizadas, con el fin de poder optimizar el escenario actual de SCEL, se presentan los resultados para las 3 lógicas utilizadas.

⁶¹ (JO 7110.126B - Consolidated Wake Turbulence (CWT), 2021, pág. 16)

⁶² (Doc 4444, Procedures for Air Navigation Services (PANS) - Air Traffic Management, 2016, pág. 121)

Operaciones segregadas:

Para este escenario se modelan la misma cantidad de vuelos para los aterrizajes y despegues, considerando que el 86% de los aterrizajes y despegues son realizados por aeronaves CAT F y el 14% restante de despegues y aterrizajes son realizados por aeronaves CAT B.

La distribución de los vuelos simulados es la siguiente:

Despegues				Arribos				
AVION CAT F		AVION CAT B		AVION CAT F			AVION CAT B	
Norte	Sur	Norte	Sur	Norte	Sur	Este	Norte	Este
41.32%	44.45%	8.71%	3.98%	41.47%	23.98%	20.36%	7.73%	6.43%

Tabla 3.38 Distribución de los vuelos simulados para escenario optimizado de SCEL.

Una vez modelados los vuelos se obtienen los siguientes resultados:

Operaciones segregadas. Escenario optimizado

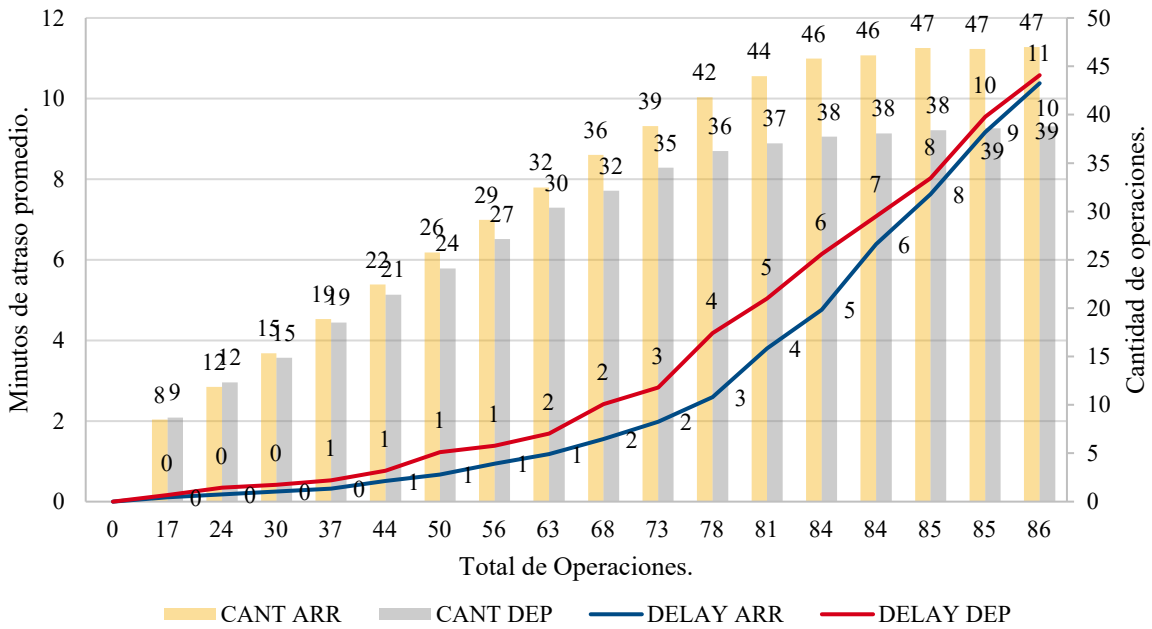


Gráfico 3.9 Cantidad de operación y atraso promedio para operaciones segregadas, escenario optimizado.

ARR	DEP	ARR DELAY	DEP DELAY	TOTAL OPS/HR
0	0	0	0	0
8.48	8.68	0.11	0.16	17.16
11.86	12.34	0.18	0.35	24.2
15.32	14.86	0.25	0.42	30.18
18.86	18.5	0.32	0.53	37.36
22.44	21.4	0.51	0.77	43.84
25.76	24.1	0.67	1.23	49.86
29.14	27.14	0.94	1.39	56.28
32.48	30.38	1.18	1.69	62.86
35.84	32.14	1.55	2.42	67.98
38.82	34.52	1.98	2.83	73.34
41.8	36.24	2.59	4.18	78.04
44	37.04	3.8	5.04	81.04
45.8	37.72	4.76	6.14	83.52
46.12	38.06	6.39	7.08	84.18
46.9	38.4	7.63	8.02	85.3
46.8	38.58	9.17	9.55	85.38
46.98	38.8	10.38	10.58	85.78

Tabla 3.39 Resultados obtenidos considerando operaciones segregadas, escenario optimizado.

Al analizar los resultados se observa que a partir de las 62 operaciones, la diferencia entre la cantidad de despegues versus aterrizajes aumenta hasta alcanzar las 8 operaciones de diferencia cuando se alcanza el techo de despegues que ronda las 38-39 operaciones por hora, a diferencia del techo de 47 operaciones por hora que alcanzan los aterrizajes. Estos valores dan como resultado un total de **86 operaciones por hora** al alcanzar los 10 minutos de demora en despegues y aterrizajes, de las cuales, el 55% on aterrizajes.

Operaciones mixtas hora punta:

Al igual que para el escenario actual, se analiza la capacidad operacional considerando la distribución del flujo en las horas punta de SCEL durante el 2024, pero con las modificaciones realizadas para estos escenarios optimizados. Para este escenario se consideran aproximaciones independientes al igual que en el escenario actual de **Operaciones mixtas hora punta** y no se consideran salidas independientes ya que todos los despegues son realizados por RWY 17R.

Una vez modelados los vuelos a analizar, se obtienen los siguientes resultados:

Operaciones mixtas hora punta. Escenario optimizado.

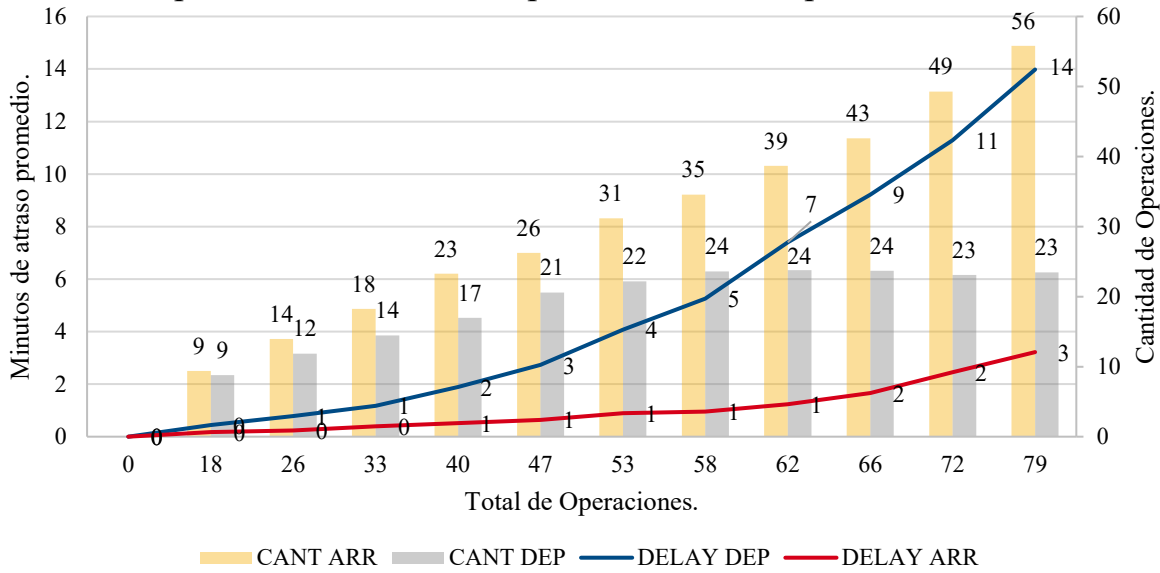


Gráfico 3.10 Cantidad de operación y atraso promedio para operaciones mixtas hora punta, escenario optimizado.

ARR	DEP	DELAY ARR	DELAY DEP	TOTAL OPS/HR
0	0	0	0	0
9.4	8.78	0.17	0.44	18.18
13.96	11.86	0.24	0.78	25.82
18.26	14.46	0.4	1.18	32.72
23.26	16.98	0.52	1.89	40.24
26.26	20.6	0.64	2.73	46.86
31.16	22.16	0.9	4.08	53.32
34.56	23.58	0.95	5.26	58.14
38.66	23.78	1.23	7.4	62.44
42.62	23.68	1.66	9.21	66.3
49.26	23.1	2.45	11.29	72.36
55.8	23.44	3.22	13.98	79.24

Tabla 3.40 Resultados obtenidos considerando uso mixto hora punta, escenario optimizado.

Al considerar operaciones mixtas en el escenario optimizado, se evidencia un desmedro considerable en la cantidad de despegues realizados por hora, en comparación a las operaciones segregadas, sin reflejarse en un aumento en los arribos por hora, por lo que se obtiene una capacidad operacional que ronda las **70 operaciones por hora**. Para el caso de los despegues, se alcanza un pico de 23 operaciones por hora versus los casi 50 aterrizajes realizados, lo que equivale a un 65% de los vuelos versus un 35% de despegues.

Operaciones mixtas:

En este escenario se busca mezclar los 2 escenarios presentados anteriormente, arribos simultáneos independientes y despegues simultáneos independientes. Es importante destacar que en este escenario se tienen varias consideraciones especiales que deben ser comentadas para entender la metodología usada. Para comenzar es necesario destacar que en la actualidad no existen los despegues simultáneos independientes, pero si existe la factibilidad de realizarlos considerando una divergencia de 45° entre las trayectorias, lo que se obtiene al combinar salidas hacia el norte por la RWY17R y despegues exclusivos al sur por la RWY17L⁶³. Respecto a los tiempos de ocupación de pista se consideran un máximo de 50 [S] para los aterrizajes y un máximo de 60 [S] para los despegues, lo que permite alternar despegues con aterrizajes de manera fluida y ágil.

Al tener estas consideraciones a la hora de modelar y simular operaciones mixtas e independientes en SCEL, se obtienen los siguientes resultados:

Operaciones mixtas independientes. Escenario optimizado.

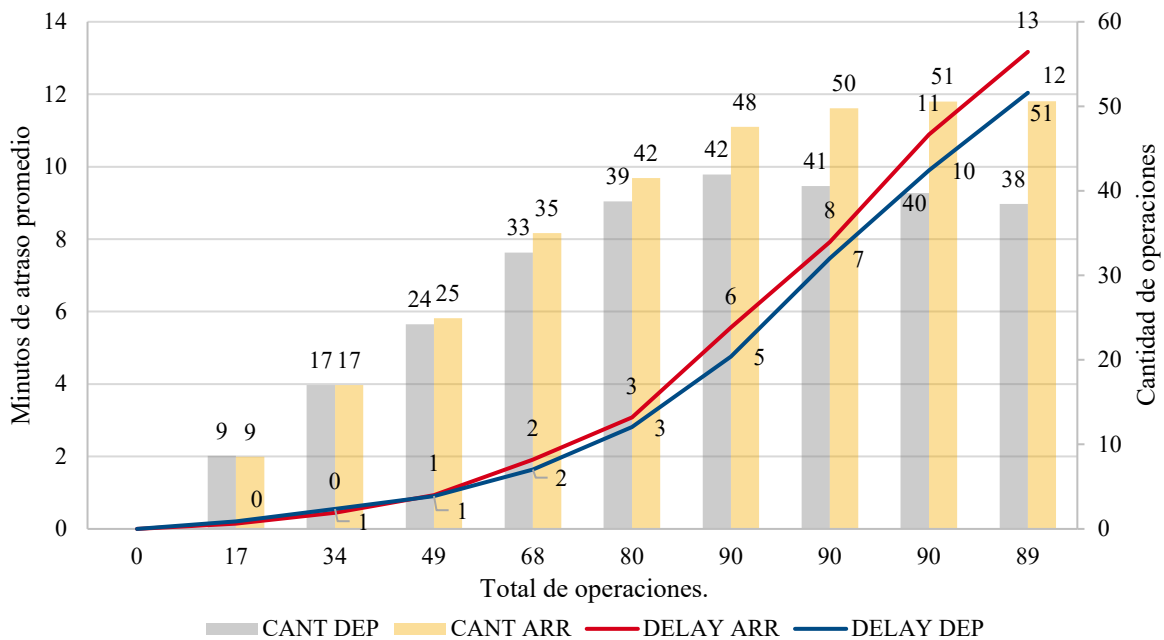


Gráfico 3.11 Cantidad de operación y atraso promedio para operaciones mixtas, escenario optimizado.

⁶³ Revisar capítulo **Normativa espacio aéreo y modos de operación.**

ARR	DEP	DELAY ARR	DELAY DEP	TOTAL OPS/HR
0	0	0	0	0
8.54	8.64	0.15	0.21	17.18
17.02	17.02	0.45	0.55	34.04
24.94	24.2	0.93	0.91	49.14
35	32.7	1.91	1.64	67.7
41.52	38.74	3.08	2.81	80.26
47.58	41.92	5.56	4.76	89.5
49.76	40.56	7.92	7.47	90.32
50.56	39.72	10.89	9.9	90.28
50.6	38.44	13.17	12.04	89.04

Tabla 3.41 Resultados obtenidos considerando uso mixto independiente, escenario optimizado.

Al analizar los resultados obtenidos se observa una capacidad operacional superior a todos los escenarios anteriormente analizados, llegando a un máximo de **90 operaciones por hora** con un atraso promedio de 10 minutos para aterrizajes y despegues. Debido a la correcta separación entre aeronaves aproximando, se logra generar los intervalos de tiempo necesarios para poder introducir un despegue entre 2 aterrizajes lo que aumenta la capacidad y no retrasa tanto el flujo como lo sería un escenario con operaciones segregadas. Además, se observa una relación bastante equilibrada entre la cantidad de despegues por hora (45%) versus aterrizajes por hora (55%). Al igual que en escenarios anteriores se observa que una vez alcanzado el máximo de operaciones por hora, los atrasos aumentan de manera acelerada mientras la cantidad de operaciones por hora se estanca o comienza a disminuir.

3.5.3. Comparación con plan maestro

Una vez obtenidos los valores de la capacidad operacional de SCEL en su situación actual y optimizada, es relevante comparar estos resultados con la proyección de demanda presentada en la última actualización del plan maestro y así poder determinar los años en los cuales se alcanzaría la saturación de SCEL para cada escenario evaluado.

La proyección de demanda de operaciones en aquellas horas de mayor saturación presentadas en la actualización del plan maestro es la siguiente:

AÑO	DEMANDA (Ops/Hr)
2030	51
2033	62
2035	69
2039	85
2045	112
2048	126
2060	204

Tabla 3.42 Proyección de la demanda de operaciones por hora, aeropuerto SCEL.

Como se observa en la **Tabla 3.42**, para el año 2030 se espera que la demanda de operaciones por hora sea solo de 10 operaciones más que las realizadas en las horas punta durante 2024 por lo que, de no modificarse nada del escenario actual, la capacidad declarada en la actualidad alcanzaría su saturación aproximadamente en el año 2030, pero si se consideran los resultados obtenidos en esta memoria esos plazos aumentarían, como se observa en la siguiente tabla:

AÑO	DEMANDA	2 RWY INDEP. PLAN MAESTRO (84 Ops/Hr)	2 RWY INDEP. SITUACIÓN ACTUAL (65 Ops/Hr)	2 RWY INDEP. SEGREGADAS OPTIMIZADAS (86 Ops/Hr)	2 RWY INDEP. MIXTAS OPTIMIZADAS (90 Ops/Hr)
2030	51	33	14	35	39
2033	62	22	3	24	28
2035	69	15	-4	17	21
2039	85	-1	-20	1	5
2045	112	-28	-47	-26	-22

Tabla 3.43 Cumplimiento de la demanda proyectada para cada escenario analizado.

Como se observa en la **Tabla 3.43**, el aeropuerto pasaría de alcanzar la saturación aproximadamente en el año 2030 a el año 2034 si se considera la situación actual sin ninguna modificación. Considerando el escenario optimizado con operaciones mixtas e



independientes, se podría postergar, por un poco más de 9 años, la fecha de saturación de SCEL ya que tiene una holgura de +5 operaciones por sobre la demanda proyectada para el año 2039.

Si se compara con la capacidad obtenida para el escenario actual, la nueva fecha hipotética de saturación sería el año 2033, 3 años más respecto a la capacidad declarada actualmente.

Estos valores son importantes de tener en consideración ya que le permiten a la autoridad, mediante modificaciones reglamentarias y operacionales, postergar la fecha de saturación y desmedro del servicio entregado en el aeropuerto SCEL.

Conclusiones

Una vez finalizado el desarrollo de esta memoria y presentado los resultados obtenidos, se pueden establecer una serie de conclusiones que responden a los objetivos planteados al comienzo de esta memoria, además de poder definir el impacto que tienen las mejoras implementadas sobre la capacidad operacional de SCEL.

Los resultados obtenidos permiten definir que la capacidad operacional que tiene SCEL en la actualidad es de **65 operaciones por hora**, la que aumenta a **90 operaciones por hora** si se implementan las mejoras propuestas en esta memoria.

A partir de los resultados obtenidos para cada uno de los escenarios analizados, se puede afirmar que la capacidad operacional declarada en la actualidad por DGAC es inferior, en al menos **10 operaciones por hora**, si se comparan con los resultados obtenidos para la situación actual de SCEL, y **de 37 operaciones por hora** si se compara con los resultados obtenidos para el escenario optimizado de SCEL considerando operaciones mixtas independientes.

Además, los resultados obtenidos demuestran que una reducción en las separaciones horizontales acompañada por una reducción de los tiempos de ocupación de pista en despegues y aterrizajes, tienen un impacto significativo en la capacidad operacional de SCEL, la cual experimenta un aumento del 38% (25 operaciones) respecto al escenario base. Al analizar más de una distribución del flujo y configuración de pistas para cada escenario evaluado, se logró evidenciar que el uso mixto de las pistas genera un aumento en la cantidad de llegadas permitidas en perjuicio de la cantidad y alto retraso en los despegues, si no se consideran las separaciones adecuadas entre aterrizajes con el fin de permitir un flujo intercalado constante como si se realizó en último escenario analizado. Estos resultados van de la mano con la documentación y teoría al respecto, que declara el uso independiente de las pistas como la configuración que mayor cantidad de aterrizajes permite realizar en comparación al uso dependiente o segregado de pistas.

Luego de revisar los 5 escenarios modelados, se concluye que la mejor alternativa es considerar despegues y aterrizajes independientes con uso mixto de las pistas de aterrizaje, lo que permite levantar la recomendación de implementar salidas independientes en SCEL. Respecto al impacto que estos resultados representan para SCEL, se debe destacar la **postergación de hasta 9 años** en la fecha de saturación del aeropuerto y que en todos los

escenarios analizados, las demoras no superaron los 5 minutos en promedio si se consideran las horas de mayor congestión durante el 2024 que alcanzaron un máximo de 41 operaciones por hora de acuerdo con la información compartida por DGAC.

Estos resultados demuestran que el uso de un software de simulación avanzado como lo es Simmod, es una ventaja respecto a las metodologías teóricas más rígidas y genéricas que existen ya que le permite al analista realizar estudios más dinámicos y poder ir evaluando de manera constante las modificaciones realizadas.

Un espacio de mejora que debe ser considerado para futuros análisis con la herramienta Simmod Pro! es realizar la capacitación ofrecida por ATAC, ya que la complejidad de uso y entendimiento es alta, y un conocimiento detallado del funcionamiento del software puede llevar a resultados más certeros al considerar todas las variables disponibles dentro de Simmod Pro! además de reducir las horas de trabajo dedicadas al modelamiento dentro de la herramienta.

Otra propuesta de mejora es considerar el uso de un software más actualizado y robusto con respecto a Simmod Pro!. Uno de estos softwares puede ser AirTOP, el cual permite analizar una mayor cantidad de variables además de permitir el modelamiento de procedimientos más modernos y actualizados que van de la mano con la constante evolución del funcionamiento de los espacios aéreos a nivel mundial.

Para finalizar, se estima necesario comentar la similitud entre los resultados obtenidos para el escenario optimizado de SCEL con los datos presentados en la última actualización del plan maestro aportando así a la confiabilidad que tienen estas herramientas de simulación respecto a sus resultados y la posibilidad de ser utilizados como referencia por las autoridades correspondientes.

4. Bibliografía

- Airbus. (s.f.). *Skywise Core [X]*. Obtenido de Aircraft.airbus: <https://aircraft.airbus.com/en/services/enhance/skywise-data-platform/skywise-core-x>
- Arca Jaurena, R. (2009). I. Propósito. En *GUÍA PARA LA APLICACIÓN DE UNA METODOLOGÍA COMÚN PARA EL CÁLCULO DE CAPACIDAD DE AEROPUERTO Y SECTORES ATC PARA LA REGIÓN SAM*. (pág. 3).
- Arca Jaurena, R. (2009). *OACI RLA/06/901, GUÍA PARA LA APLICACIÓN DE UNA METODOLOGÍA COMÚN PARA EL CÁLCULO DE CAPACIDAD DE AEROPUERTO Y SECTORES ATC PARA LA REGIÓN SAM*. Lima.
- ATAC. (2006). Figure 8: Proposed Runway 29 Access Improvement at Oakland International Airport. En *Oakland International Airport Master Plan Preparation Report* (pág. 18).
- ATAC. (2006). Figure 9: Proposed High-Speed Runway Exit at Oakland International Airport. En *Oakland International Airport Master Plan Preparation Report* (pág. 19).
- ATAC Corporation. (2006). *SIMMOD Simulation Airfield and Airspace Simulation Report Oakland International Airport Master Plan Preparation Report*. Port of Oakland.
- ATAC. (s.f.). *Simmod PRO!* Obtenido de ATAC: <https://www.atac.com/simmod-pro/>
- Aybek Çetek, F., & Aydoğan, E. (2019). Air Traffic Flow Impact Analysis of RECAT for Istanbul New Airport using Discrete-Event Simulation. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 434-444. doi:10.29130/dubited.457442
- AYBEK CETEK, F., & AYDOĞAN, E. (2019). Figure 4. The simulation model of Istanbul New Airport Phase 1-a in SIMMOD. En *Air Traffic Flow Impact Analysis of RECAT for Istanbul New Airport using Discrete-Event Simulation* (pág. 439).
- Bang, J., & Kim, D. (2019). Estimation of Incheon International Airport capacity by using aircraft delay simulation model. *Journal of the Korean Society for Aviation and Aeronautics*, 27(1), 20-25. doi:10.12985/ksaa.2019.27.1.020
- Bang, J., & Kim, D. (2019). Fig 2. Modeling Incheon international airport. En *Estimation of Incheon International Airport Capacity by using Aircraft Delay Simulation Model* (pág. 22).
- Bertinio, J., Boyajian, E., & Johnson, N. (2011). 21 Century, fast-time airport and airspace modeling: Analysis with Simmod. *Managing the Skies: A Journal of the FAA*

- Managers Association*, 21-23. Obtenido de <https://www.atac.com/wp-content/uploads/2020/12/21st-C-Fast-time-Airport-and-Airspace-Modeling-Analysis-with-Simmod-MTS-MayJune-2011.pdf>
- DGAC. (2025). SCEL - STAR 11 RNAV RWY 17R SUKSA 2A. En *AIP- CHILE AMDT N°99* (pág. 681).
- Dirección General de Aeronáutica Civil (DGAC). (2017). *DAN 14 154: Normas de diseño y operación para aeródromos*. Santiago, Chile: Dirección General de Aeronáutica Civil. Obtenido de <https://www.dgac.gob.cl/dan-14-154/>
- Dirección General de Aeronáutica Civil. (2023). *DAN 91 - Reglas del Aire*. Santiago.
- Dirección General de Aeronáutica Civil. (30 de Noviembre de 2023). *ENR 1.9: Organización de la gestión de afluencia del tránsito aéreo (ATFM)*. Obtenido de AIP-Chile: https://aipchile.dgac.gob.cl/dasa/aip_chile_con_contenido/ais/2%20ENR%20Parte%202/ENR%201%20Reglas%20Generales/jENR%201.9-1%20%20ATFM.pdf
- Dirección General de Aeronáutica Civil. (2024). *Bitacora operaciones [Base de datos]*. Santiago, Chile.
- Dirección General de Aeronáutica Civil. (15 de Mayo de 2025). *AIP-Chile Vol. II: Tabla de coordenadas – SCEL (Amend. 99)*. Obtenido de AIP-Chile: https://aipchile.dgac.gob.cl/dasa/aip_chile_con_contenido/aipmap/SCEL/SCEL%20Tabla%20de%20coordenadas.pdf
- Dirección General de Aeronáutica Civil. (15 de Mayo de 2025). *AIP-Chile Vol. I: AD 2 SCEL – Aeródromo Arturo Merino Benítez (AMDT 63)*. Obtenido de AIP-Chile: https://aipchile.dgac.gob.cl/dasa/aip_chile_con_contenido/ais/3%20AD%20Parte%203/AD%202a%20Aeropuertos/8%20-AD%202%20SCEL.pdf
- Dirección General de Aeronáutica Civil de Chile. (2025). *AIP-Chile VOL II AMDT N° 99*. Obtenido de https://aipchile.dgac.gob.cl/aip/vol2/seccion/proc:https://aipchile.dgac.gob.cl/dasa/aip_chile_con_contenido/aipmap/AIP-CHILE%20VOL%20II//AIP-Chile%20VOL%20II%20Completo%20-%20actualizado%20al%2015-05-2025.pdf
- Dirección General de Aeronáutica Civil. (s.f.). *Normativa para Opinión*. Obtenido de [dgac.gob: https://www.dgac.gob.cl/normativa/reglamentacion-aeronautica/normativa-para-opinion/](https://www.dgac.gob.cl/normativa/reglamentacion-aeronautica/normativa-para-opinion/)

- FAA. (1983). Figure 2-1 Capacity and ASV for long range planning. En A. Capacity.
- FAA. (1983). FIGURE 3-43. HOURLY CAPACITY OF RUNWAY-USE DIAGRAM NOS 1. 54 FOR IFR CONDITIONS. En *Airport Capacity and Delay* (pág. 48).
- FAA. (2014). Table 1. Capacity Rate Ranges for Current Operations at the Core Airports. En *Airport Capacity Profiles* (pág. 9).
- Federal Aviation Administration. (2021). *JO 7110.126B - Consolidated Wake Turbulence (CWT)*.
- Flightradar24. (2025). *flightradar*. Obtenido de flightradar24: <https://www.flightradar24.com>
- International Civil Aviation Organization. (2010). *Manual de gestion de afluencia del tránsito aéreo, Manual ATFM CAR/SAM*. International Civil Aviation Organization.
- International Civil Aviation Organization. (2016). *Doc 4444, Procedures for Air Navigation Services (PANS) - Air Traffic Management*. Montréal, Quebec, Canada: International Civil Aviation Organization.
- International Civil Aviation Organization. (2018). *Doc 8168, Procedures for Air Navigation Services - Aircraft Operations Volume I - Flight Procedure*. Montréal, Quebec, Canada: International Civil Aviation Organization.
- International Civil Aviation Organization. (2018). *Doc 8168, Procedures for Air Navigation Services - Aircraft Operations Volume III - Aircraft Operating Procedures*. Montréal, Quebec, Canada: International Civil Aviation Organization.
- International Civil Aviation Organization. (2020). 1.3.3. En I. C. Organization, *Doc 9643, Manual on Simultaneous Operations on Parallel or Near-Parallel Instrument Runways (SOIR)* (pág. 17).
- International Civil Aviation Organization. (2020). 2.2.1 - Requirements and procedures. En *DOC 9643 - Manual on Simultaneous Operations on Parallel or Near-Parallel Instrument Runways (SOIR)* (págs. 20-26).
- International Civil Aviation Organization. (2020). 3.2 - Requirements and Procedures. En *DOC 9643 - Manual on Simultaneous Operations on Parallel or Near-Parallel Instrument Runways (SOIR)*.
- International Civil Aviation Organization. (2020). *Doc 8168, Procedures for Air Navigation Services - Aircraft Operations Volume II - Construction of Visual and Instrument*

Flight Procedures. Montréal, Quebec, Canada: International Civil Aviation Organization.

International Civil Aviation Organization. (2020). *Doc 9643, Manual on Simultaneous Operations on Parallel or Near-Parallel Instrument*. Montréal, Quebec, Canada: International Civil Aviation Organization.

International Civil Aviation Organization. (2020). Figure 2-3. NOZ and NTZ example for one runway centre line spacing. En *Doc 9643 - Manual on Simultaneous Operations on Parallel or Near-Parallel Instrument Runways (SOIR)* (pág. 27).

International Civil Aviation Organization. (2020). Figure 3-1. Independent instrument departures when parallel runway spacing is less than 1 525 m (5 000 ft) but no less than 760 m (2 500 ft). En *Doc 9643 - Manual on Simultaneous Operations on Parallel or Near-Parallel Instrument Runways (SOIR)* (pág. 42).

International Civil Aviation Organization. (2022). *Annex 14, Aerodromes - Volume I - Aerodrome Design and Operations*. International Civil Aviation Organization.

International Civil Aviation Organization. (2022). Figure 3-3. Rapid exit taxiway. En I. C. Organization, *Annex 14 - Aerodromes* (pág. 78).

International Civil Aviation Organization. (2020). Figure 3-1. Independent instrument departures when parallel runway spacing is less than 1 525 m (5 000 ft) but no less than 760 m (2 500 ft). En *Doc 9643 - Manual on Simultaneous Operations on Parallel or Near-Parallel Instrument Runways (SOIR)* (pág. 42).

Junta de Aeronáutica Civil. (Mayo de 2025). *BD_Trafico_aereo-2014-2025 [Base de datos]*. Obtenido de jac.gob: https://www.jac.gob.cl/wp-content/uploads/2025/05/BD_Trafico_aereo-2014-2025.xls

Junta de Aeronáutica Civil. (2025). *Panel Interactivo – Operaciones de Aeronaves*. Obtenido de jac.gob: <https://www.jac.gob.cl/informes-del-numero-de-operaciones-realizadas-en-los-aeropuertos-y-aerodromos-de-chile/>

Junta de Aeronáutica Civil de Chile. (2024). *Tráfico Aéreo Diciembre-2024*. Obtenido de <https://www.jac.gob.cl/wp-content/uploads/2025/01/202412-Infogr%C3%A1fico.pdf>



- Ministerio de Obras Públicas (Dirección de Planificación). (2021). *SCL1-20-GE-GN-IN-002 Actualización Plan Maestro Aeropuerto Arturo Merino Benítez de Santiago y Estudio Localización NAMZC*.
- Ministerio de Obras Publicas. (2021). *SCL1-20-GE-GN-IN-001 - INFORME FINAL PLAN MAESTRO AMB*.
- QGIS. (2025). *QGIS*. Obtenido de QGIS: <https://qgis.org/>
- Servicio Nacional de Turismo (Sernatur). (Abril de 2025). *Movimiento turístico internacional [Sitio web]*. Obtenido de Sernatur: <https://www.sernatur.cl/dataturismo/movimiento-turistico-internacional/>
- Transoft solutions. (s.f.). *AirTOP*. Obtenido de Transoftsolutions: <https://www.transoftsolutions.com/aviation/software/airport-airspace-fast-time-simulation/airtop-overview/>
- United States Department of Transportation, Federal Aviation Administration. (1983). *Advisory Circular 150/5060-5: Airport capacity and delay*. Obtenido de https://www.faa.gov/documentLibrary/media/Advisory_Circular/150_5060_5.pdf
- United States Department of Transportation, Federal Aviation Administration. (2014). *Airport Capacity Profiles*. Office of Airports, Airport Planning and Programming. Obtenido de https://www.faa.gov/sites/faa.gov/files/airports/planning_capacity/profiles/Airport-Capacity-Profiles-2014.pdf



Anexo 1: Reportes y resultados de las simulaciones.

Escenario Actual

Operaciones segregadas:

SCEL AIRPORT -- ALL RUNWAY OPERATIONS PER HOUR
BASED ON 50 ITERATIONS INCLUDED IN THE FOLLOWING SIMMOD RUN:

ALL AIRLINES, AIRPORTS, AND ITERATIONS ARE INCLUDED IN THIS REPORT.

TIME INTERVAL	SCEL ARRIVALS	SCEL DEPARTURES	SCEL OPERATIONS
06:00-07:00	0	0	0
07:00-08:00	3.56	1.18	4.74
08:00-09:00	32.14	32.96	65.10
09:00-10:00	10.30	12.86	23.16
10:00-11:00	0	0	0
11:00-12:00	0	0	0
SCEL OPS TOTALS:	46.00	47.00	93.00

SCEL AIRPORT -- AVERAGE ARRIVAL AIRCRAFT TRAVEL AND DELAY TIMES
BASED ON 50 ITERATIONS INCLUDED IN THE FOLLOWING SIMMOD RUN:

ALL AIRLINES, AIRPORTS, AND ITERATIONS ARE INCLUDED IN THIS REPORT.

TIME INTERVAL	ARRIVAL FLOW	DELAY TIMES (MIN)			# OF FLIGHTS WITH DELAY (MIN)			
		TOT	SDV	AVE	< 5	5-10	10-15	> 15
06:00-07:00	0	0	0	0	0	0	0	0
07:00-08:00	3.56	3.5	1.25	0.99	3.5	0.0	0	0
08:00-09:00	32.14	272.8	5.25	8.49	9.3	10.9	8.2	3.7

SCEL AIRPORT -- AVERAGE DEPARTURE AIRCRAFT TRAVEL AND DELAY TIMES
BASED ON 50 ITERATIONS INCLUDED IN THE FOLLOWING SIMMOD RUN:

ALL AIRLINES, AIRPORTS, AND ITERATIONS ARE INCLUDED IN THIS REPORT.

TIME INTERVAL	DEPARTURE FLOW	DELAY TIMES (MIN)			# OF FLIGHTS WITH DELAY (MIN)			
		TOT	SDV	AVE	< 5	5-10	10-15	> 15
06:00-07:00	0	0	0	0	0	0	0	0
07:00-08:00	1.18	0	0.52	0.21	1.2	0	0	0
08:00-09:00	32.96	260.0	5.00	7.89	9.9	13.5	6.5	3.1

Operaciones mixtas, distribución hora punta:

SCEL AIRPORT -- ALL RUNWAY OPERATIONS PER HOUR
BASED ON 50 ITERATIONS INCLUDED IN THE FOLLOWING SIMMOD RUN:

ALL AIRLINES, AIRPORTS, AND ITERATIONS ARE INCLUDED IN THIS REPORT.

TIME INTERVAL	SCEL ARRIVALS	SCEL DEPARTURES	SCEL OPERATIONS
06:00-07:00	0	0	0
07:00-08:00	2.86	0.78	3.64
08:00-09:00	38.58	21.52	60.10
09:00-10:00	3.56	10.70	14.26
10:00-11:00	0	0	0
11:00-12:00	0	0	0
SCEL OPS TOTALS:	45.00	33.00	78.00

SCEL AIRPORT -- AVERAGE ARRIVAL AIRCRAFT TRAVEL AND DELAY TIMES
BASED ON 50 ITERATIONS INCLUDED IN THE FOLLOWING SIMMOD RUN:

ALL AIRLINES, AIRPORTS, AND ITERATIONS ARE INCLUDED IN THIS REPORT.

TIME INTERVAL	ARRIVAL FLOW	DELAY TIMES (MIN)			# OF FLIGHTS WITH DELAY (MIN)			
		TOT	SDV	AVE	< 5	5-10	10-15	> 15
06:00-07:00	0	0	0	0	0	0	0	0
07:00-08:00	2.86	1.3	0.82	0.47	2.9	0	0	0
08:00-09:00	38.58	69.4	2.17	1.80	35.3	2.9	0.4	0

SCEL AIRPORT -- AVERAGE DEPARTURE AIRCRAFT TRAVEL AND DELAY TIMES
BASED ON 50 ITERATIONS INCLUDED IN THE FOLLOWING SIMMOD RUN:

ALL AIRLINES, AIRPORTS, AND ITERATIONS ARE INCLUDED IN THIS REPORT.

TIME INTERVAL	DEPARTURE FLOW	DELAY TIMES (MIN)			# OF FLIGHTS WITH DELAY (MIN)			
		TOT	SDV	AVE	< 5	5-10	10-15	> 15
06:00-07:00	0	0	0	0	0	0	0	0
07:00-08:00	0	0	0.69	0.51	0.8	0	0	0
08:00-09:00	21.52	211.5	6.81	9.83	5.6	7.1	4.4	4.5



Escenario Optimizado

Operaciones segregadas:

SCEL AIRPORT -- ALL RUNWAY O P E R A T I O N S PER HOUR
BASED ON 50 ITERATIONS INCLUDED IN THE FOLLOWING SIMMOD RUN:

ALL AIRLINES, AIRPORTS, AND ITERATIONS ARE INCLUDED IN THIS REPORT.

TIME INTERVAL	SCEL ARRIVALS	SCEL DEPARTURES	SCEL OPERATIONS
06:00-07:00	0	0	0
07:00-08:00	5.68	1.60	7.28
08:00-09:00	46.98	38.80	85.78
09:00-10:00	28.74	34.58	55.32
10:00-11:00	0	0.02	0.02
11:00-12:00	0	0	0
SCEL OPS TOTALS:	73.40	75.00	148.40

SCEL AIRPORT -- AVERAGE A R R I V A L AIRCRAFT TRAVEL AND DELAY TIMES
BASED ON 50 ITERATIONS INCLUDED IN THE FOLLOWING SIMMOD RUN:

ALL AIRLINES, AIRPORTS, AND ITERATIONS ARE INCLUDED IN THIS REPORT.

TIME INTERVAL	ARRIVAL FLOW	DELAY TIMES (MIN)			# OF FLIGHTS WITH DELAY (MIN)			
		TOT	SDV	AVE	< 5	5-10	10-15	> 15
06:00-07:00	0	0	0	0	0	0	0	0
07:00-08:00	5.68	6.9	1.24	1.21	5.6	0.1	0	0
08:00-09:00	46.98	487.5	5.88	10.38	10.3	13.0	12.9	10.7

SCEL AIRPORT -- AVERAGE D E P A R T U R E AIRCRAFT TRAVEL AND DELAY TIMES
BASED ON 50 ITERATIONS INCLUDED IN THE FOLLOWING SIMMOD RUN:

ALL AIRLINES, AIRPORTS, AND ITERATIONS ARE INCLUDED IN THIS REPORT.

TIME INTERVAL	DEPARTURE FLOW	DELAY TIMES (MIN)			# OF FLIGHTS WITH DELAY (MIN)			
		TOT	SDV	AVE	< 5	5-10	10-15	> 15
06:00-07:00	0	0	0	0	0	0	0	0
07:00-08:00	1.60	0.5	0.52	0.31	1.6	0	0	0
08:00-09:00	38.80	410.5	6.76	10.58	9.7	10.5	8.7	9.9

Operaciones mixtas, distribución hora punta:

SCEL AIRPORT -- ALL RUNWAY O P E R A T I O N S PER HOUR
BASED ON 50 ITERATIONS INCLUDED IN THE FOLLOWING SIMMOD RUN:

ALL AIRLINES, AIRPORTS, AND ITERATIONS ARE INCLUDED IN THIS REPORT.

TIME INTERVAL	SCEL ARRIVALS	SCEL DEPARTURES	SCEL OPERATIONS
06:00-07:00	0	0	0
07:00-08:00	0	1.24	1.24
08:00-09:00	49.26	23.10	72.36
09:00-10:00	23.74	22.66	46.40
10:00-11:00	0	0	0
11:00-12:00	0	0	0
SCEL OPS TOTALS:	73.00	47.00	120.00

SCEL AIRPORT -- AVERAGE A R R I V A L AIRCRAFT TRAVEL AND DELAY TIMES
BASED ON 50 ITERATIONS INCLUDED IN THE FOLLOWING SIMMOD RUN:

ALL AIRLINES, AIRPORTS, AND ITERATIONS ARE INCLUDED IN THIS REPORT.

TIME INTERVAL	ARRIVAL FLOW	DELAY TIMES (MIN)			# OF FLIGHTS WITH DELAY (MIN)			
		TOT	SDV	AVE	< 5	5-10	10-15	> 15
06:00-07:00	0	0	0	0	0	0	0	0
07:00-08:00	0	0	0	0	0	0	0	0
08:00-09:00	49.26	120.6	3.47	2.45	41.0	5.5	2.3	0.5

SCEL AIRPORT -- AVERAGE D E P A R T U R E AIRCRAFT TRAVEL AND DELAY TIMES
BASED ON 50 ITERATIONS INCLUDED IN THE FOLLOWING SIMMOD RUN:

ALL AIRLINES, AIRPORTS, AND ITERATIONS ARE INCLUDED IN THIS REPORT.

TIME INTERVAL	DEPARTURE FLOW	DELAY TIMES (MIN)			# OF FLIGHTS WITH DELAY (MIN)			
		TOT	SDV	AVE	< 5	5-10	10-15	> 15
06:00-07:00	0	0	0	0	0	0	0	0
07:00-08:00	1.24	0	0.43	0.19	1.2	0	0	0
08:00-09:00	23.10	260.8	9.01	11.29	7.7	4.4	3.5	7.6



Operaciones mixtas e independientes:

SCEL AIRPORT -- ALL RUNWAY OPERATIONS PER HOUR
BASED ON 50 ITERATIONS INCLUDED IN THE FOLLOWING SIMMOD RUN:

ALL AIRLINES, AIRPORTS, AND ITERATIONS ARE INCLUDED IN THIS REPORT.

TIME INTERVAL	SCEL ARRIVALS	SCEL DEPARTURES	SCEL OPERATIONS
06:00-07:00	0	0	0
07:00-08:00	5.86	1.58	7.44
08:00-09:00	49.76	40.56	90.32
09:00-10:00	14.10	28.86	42.96
10:00-11:00	0	0	0
11:00-12:00	0	0	0

SCEL OPS TOTALS: 69.72 71.00 140.72

SCEL AIRPORT -- AVERAGE ARRIVAL AIRCRAFT TRAVEL AND DELAY TIMES
BASED ON 50 ITERATIONS INCLUDED IN THE FOLLOWING SIMMOD RUN:

ALL AIRLINES, AIRPORTS, AND ITERATIONS ARE INCLUDED IN THIS REPORT.

TIME INTERVAL	ARRIVAL FLOW	DELAY TIMES (MIN)			# OF FLIGHTS WITH DELAY (MIN)			
		TOT	SDV	AVE	< 5	5-10	10-15	> 15
06:00-07:00	0	0	0	0	0	0	0	0
07:00-08:00	5.86	6.4	1.38	1.10	5.7	0.1	0	0
08:00-09:00	49.76	394.2	5.42	7.92	17.3	16.3	10.8	5.4

SCEL AIRPORT -- AVERAGE DEPARTURE AIRCRAFT TRAVEL AND DELAY TIMES
BASED ON 50 ITERATIONS INCLUDED IN THE FOLLOWING SIMMOD RUN:

ALL AIRLINES, AIRPORTS, AND ITERATIONS ARE INCLUDED IN THIS REPORT.

TIME INTERVAL	DEPARTURE FLOW	DELAY TIMES (MIN)			# OF FLIGHTS WITH DELAY (MIN)			
		TOT	SDV	AVE	< 5	5-10	10-15	> 15
06:00-07:00	0	0	0	0	0	0	0	0
07:00-08:00	1.58	1.4	0.79	0.86	1.6	0	0	0
08:00-09:00	40.56	303.1	6.22	7.47	17.4	11.9	6.7	4.6