



UNIVERSIDAD TECNICA  
FEDERICO SANTA MARIA

Departamento de Obras Civiles

**PROPUESTA DE UN MODELO PRELIMINAR DE  
DETERIORO DE PAVIMENTO PARA EL  
AEROPUERTO INTERNACIONAL ARTURO MERINO  
BENÍTEZ, BASADO EN LA NORMATIVA NACIONAL,  
CONDICIONES OPERATIVAS Y EXPERIENCIA  
INTERNACIONAL.**

Memoria de Título presentada por

**Nicolás Ignacio Chacón Pérez**

como requisito parcial para optar al título de la carrera de

**Ingeniería Civil**

Profesor Guía  
Gabriel García Saá

febrero de 2026



UNIVERSIDAD TÉCNICA  
FEDERICO SANTA MARÍA

## 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:** "PROPUESTA DE UN MODELO PRELIMINAR DE DETERIORO DE PAVIMENTO PARA EL AEROPUERTO INTERNACIONAL ARTURO MERINO BENÍTEZ, BASADO EN LA NORMATIVA NACIONAL, CONDICIONES OPERATIVAS Y EXPERIENCIA INTERNACIONAL."

**Nombre del candidato(a):** Nicolás Ignacio Chacón Pérez

**Carrera / Grado:** Ingeniería Civil

**Campus:** San Joaquín **Departamento:** Obras Civiles

### 2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, Gabriel García S., 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 (marcar una opción)

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 (**marcar una opción**):

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:** 30 de marzo de 2026 **Firma:** 

**Estudiante o Candidato(a):**

**Fecha:** 30 de marzo de 2026 **Firma:** \_\_\_\_\_



UNIVERSIDAD TECNICA  
FEDERICO SANTA MARIA

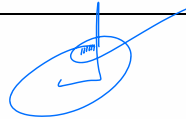
TITULO DE LA MEMORIA:

**Propuesta de un modelo preliminar de deterioro de pavimento para el Aeropuerto Arturo Merino Benítez, basado en la normativa nacional, condiciones operativas y experiencia internacional.**

AUTOR:

**Nicolás Ignacio Chacón Pérez**

TRABAJO DE MEMORIA, presentado como requisito parcial para optar al título de la carrera de INGENIERIA CIVIL de la Universidad Técnica Federico Santa María.

	<u>Nombre</u>	<u>Firma</u>
Prof. Guía	Gabriel García S.	
Miembro 1 Comisión	Aleli Osorio L.	
Miembro 2 Comisión	.....	.....

Santiago, Chile, febrero de 2026



## INDICE

Resumen.....	5
1 Introducción .....	5
2 Marco teórico .....	6
2.1 Definición del Problema.....	8
2.2 Criterios claves a considerar en la propuesta .....	9
3 Objetivos .....	10
3.1 Objetivo general .....	10
3.2 Objetivos específicos.....	11
4 Metodología .....	11
4.1 Supuestos y delimitaciones del estudio .....	11
4.2 Etapa 1. Construcción y normalización de bases de datos .....	11
4.3 Etapa 2. Selección de aeropuertos análogos.....	12
4.4 Etapa 3. Transferencia/ajuste de modelos y validación interna.....	14
5 Resultados .....	15
5.1 Consolidación de información y definición de variables para AMB y EE.UU.....	15
5.2 Construcción del indicador de tráfico comparable .....	16
5.3 Resultados de similitud: selección inicial y depuración de candidatos .....	17
5.4 Búsqueda de modelos/curvas y selección final de aeropuertos con datos PCI.....	19
5.5 Obtención de curvas PCI.....	20
5.6 Curvas representativas para AMB.....	22
5.7 Compatibilidad estadística entre curvas AMB vs aeropuertos finalistas .....	24
5.8 Evaluación con curva PaveAir .....	27
6 Análisis de resultados.....	28
7 Implicancia de normativa nacional.....	29
7.1 Rozamiento: obligación de medición y publicación (DAR-14 / DS 173).....	29
7.2 Requerimientos DGAC para mantenimiento de pavimentos y rugosidad (DAN 14 153) .....	29
7.3 PCI como herramienta de gestión en Chile .....	30
7.4 Limitación crítica: rugosidad.....	30
8 Conclusión.....	30
9 Recomendaciones y trabajos futuros .....	31
10 Referencias .....	32
11 Anexos.....	34
Anexo 1: AMB.....	34
Anexo 2: Base de datos Excel maestro.....	34
Anexo 3: Aeropuertos propuestos .....	35
Anexo 4: Gráfico de curvas por sección.....	36
Anexo 5: Gráficos de curvas por pista .....	39



UNIVERSIDAD TÉCNICA  
FEDERICO SANTA MARÍA

## **“PROPUESTA DE UN MODELO PRELIMINAR DE DETERIORO DE PAVIMENTO PARA EL AEROPUERTO INTERNACIONAL ARTURO MERINO BENÍTEZ, BASADO EN LA NORMATIVA NACIONAL, CONDICIONES OPERATIVAS Y EXPERIENCIA INTERNACIONAL.”**

Nicolás Chacón Pérez, Gabriel García S.

Universidad Técnica Federico Santa María

### **Resumen**

El Aeropuerto Internacional Arturo Merino Benítez (AMB) es la principal infraestructura aeroportuaria de Chile, concentra el mayor volumen de tráfico aéreo nacional e internacional. Su operación eficiente y segura depende en gran medida de la condición de sus pavimentos, cuya evaluación periódica se realiza mediante indicadores como el Índice de Condición del Pavimento (PCI) y el coeficiente de fricción superficial. Sin embargo, la información disponible en AMB presenta limitaciones tanto en frecuencia debido a largos intervalos entre mediciones, como en cobertura temporal con la escasa cantidad de años con datos históricos, lo que dificulta la implementación de sistemas de gestión predictivos. En este contexto, se propone una metodología preliminar, basada en normativa nacional y en experiencias de aeropuertos internacionales que permitan adaptar un modelo de deterioro de pavimentos a las condiciones operativas y a la disponibilidad de datos de AMB. Este trabajo se desarrolla en el marco del proyecto FONDEF ID23I10113, “Desarrollo y validación de un sistema de gestión de pavimentos aeroportuarios para la red primaria de Chile”, cuyo propósito es crear y validar una herramienta que optimice la administración de estos pavimentos mediante el análisis integrado y sostenible de sus componentes. La presente memoria constituye un primer paso hacia ese objetivo, estableciendo las bases técnicas y conceptuales para una propuesta metodológica adaptada al contexto chileno, sustentada en normativa nacional, literatura técnica, experiencias internacionales, y diseñada para ser implementada como calibrada cuando se disponga de registros más completos y continuos.

Palabras clave: Aeropuerto, SGPA, modelo de deterioro, PCI.

### **1 Introducción**

La infraestructura aeroportuaria representa un componente esencial para el desarrollo económico y social, facilitando la conectividad, el comercio y el turismo a nivel nacional e internacional, (The World Bank, 2020). En Chile, el crecimiento sostenido del transporte aéreo en las últimas décadas ha generado una mayor demanda sobre la capacidad operativa y el mantenimiento de sus aeropuertos. Más de 28.2 millones de pasajeros se movilizaron desde los diferentes terminales del país a diferentes destinos, (Junta de Aeronáutica Civil, 2024).

Dado el incremento en la actividad aeronáutica, es fundamental mantener un servicio eficiente y seguro, (JAC, 2025). Para ello, resulta esencial poner especial énfasis en los pavimentos, ya que estos proporcionan la superficie sobre la cual maniobran todas las aeronaves. Por ello, es necesario implementar medidas adecuadas para su mantenimiento, conservación o, si corresponde, rehabilitación oportuna, con el fin de evitar un deterioro excesivo provocado por diversos factores como el clima, el tráfico aéreo, entre otros daños, (Roh et al., 2023).

El principal organismo encargado de regular los servicios de la infraestructura aeroportuaria en Chile corresponde a la Dirección de Aeropuertos del Ministerio de Obras Públicas, encargado del desarrollo y mantenimiento de la infraestructura aeroportuaria del país, (DAP, 2025). Actualmente, la Dirección de Aeropuertos fiscaliza y controla 319 aeródromos, 124 helipuertos y 7 aeropuertos, de los cuales 17



corresponden a complejos de la red primaria, mientras que 12 se ubican en la red secundaria, 11 pertenecientes a la red de aeródromos militares y, finalmente, 279 corresponden a pequeños aeródromos. Dichas infraestructuras, en su totalidad, conforman la red nacional de aeropuertos y aeródromos, (DGAC, 2025)

Entre estos destaca el Aeropuerto Internacional Arturo Merino Benítez (AMB), cuya infraestructura es clave para la conectividad en Chile. Este aeropuerto se posiciona como uno de los proyectos más relevantes de la nación, reflejando su papel fundamental en la economía global, así como su magnitud e importancia en el contexto tanto nacional como internacional, (Amunátegui et al., 2018). Dado este nivel de relevancia, su correcta operación se vuelve una prioridad, lo que implica que la condición de sus pavimentos debe mantenerse en estándares altos.

Para evaluar su estado se utilizan indicadores como PCI y el coeficiente de fricción superficial, a partir de los cuales se pueden tomar decisiones sobre el tratamiento más adecuado frente a un deterioro. Sin embargo, actualmente estas decisiones se realizan de manera reactiva, es decir, a medida que los deterioros ocurren. Lo correcto es adoptar una política de intervención que permita tomar decisiones costo eficientes para tratar los deterioros que se van a producir, tales como intervenir en el momento en que se minimizan los costos de intervención cuando las condiciones materiales lo permitan. Para ello es posible utilizar un concepto clave que permite conocer el comportamiento durante la vida útil del pavimento: un Sistema de Gestión de Pavimentos Aeroportuarios (SGPA). Este sistema busca organizar la información disponible para apoyar la toma de decisiones en conservación y rehabilitación. Es así que, no se limita únicamente a describir el estado actual del pavimento, sino que también requiere predecir cómo evolucionará la condición de este en el tiempo. De esa necesidad surgen los modelos de deterioro, herramientas que permiten estimar el comportamiento futuro del pavimento durante su vida en servicio. Estos modelos suelen expresarse mediante fórmulas matemáticas que describen la evolución del estado del pavimento a lo largo del tiempo, como datos de entrada requieren información histórica sobre el pavimento, mediciones de su estado, mantenimientos realizados, condiciones climáticas del entorno, entre otros factores, (Solminihač et al., 1998).

A pesar de la creciente necesidad de mantener la infraestructura aeroportuaria en condiciones operativas de alta exigencia, actualmente no es posible desarrollar un modelo confiable de deterioro del pavimento en AMB. Esta limitación se debe principalmente a la falta de los datos de entrada mínimos para elaborar un modelo propio del aeropuerto. Esto difiere con aeropuertos de similar envergadura a nivel internacional, donde existen bases de datos robustas y sistemas de gestión bien estructurados. Esta problemática es aún más relevante si se considera que AMB concentra el mayor volumen de operaciones del país, siendo un nodo crítico de la conectividad aérea de Chile, (Amunátegui et al., 2018).

En este contexto, surge la propuesta de desarrollar un modelo preliminar de deterioro de pavimentos basado en experiencias internacionales que representen adecuadamente las condiciones operativas de AMB y cumplan con los criterios técnicos y normativos nacionales. Estas metodologías se clasificarán bajo ciertos parámetros que permitirán seleccionar la opción más factible, de modo de extraer el modelo que mejor represente la condición de los pavimentos en este aeropuerto. Posteriormente, se dejarán establecidas las bases para que, una vez que se disponga de más información sólida de AMB, sea posible calibrar un modelo propio y específico para sus condiciones.

## 2 Marco teórico

En el desarrollo de esta investigación resulta fundamental establecer con claridad los conceptos clave que conforman el marco de análisis técnico. En particular, se inicia desde una perspectiva macro, reconociendo a los aeropuertos como infraestructuras críticas para el desarrollo económico, la integración territorial y la conectividad global, (Miah et al., 2020; The World Bank, 2020). Los aeropuertos cumplen funciones estratégicas en la movilidad de personas y bienes, y su operación eficiente depende en gran medida del buen estado funcional y estructural de sus componentes físicos, especialmente los pavimentos, (Shahin, 2005). El desempeño adecuado de un aeropuerto no solo responde a sus dimensiones arquitectónicas o logísticas, sino también al estado de sus pistas, calles de



## UNIVERSIDAD TECNICA FEDERICO SANTA MARIA

rodaje y plataformas, las cuales están expuestas continuamente a factores operacionales que inciden en su deterioro, como el tipo y volumen del tráfico aéreo, las características estructurales de las aeronaves, las condiciones climáticas locales y la frecuencia de maniobras sobre la superficie, (Solminihaç et al., 1998).

En el caso de AMB, los pavimentos de sus pistas presentan una composición tanto de asfalto como mixta, con estructuras flexibles (mezcla asfáltica en caliente) y rígidas (hormigón hidráulico en losas), lo que determina su comportamiento mecánico y sus modos de falla característicos, (IDOM, 2022). En este contexto, los pavimentos se presentan como el objeto técnico central de esta investigación. Comprender su comportamiento requiere abordar herramientas conceptuales y metodológicas que permitan su evaluación y gestión técnica. Es en esta línea donde adquieren relevancia los Sistemas de Gestión de Pavimentos Aeroportuarios, los modelos de deterioro y los indicadores de condición como el PCI y el coeficiente de fricción, los cuales permiten caracterizar su estado funcional y anticipar su evolución en el tiempo, (Shahid et al., 2025).

El uso de modelos de deterioro internacionales, fundamentados en marcos normativos aplicables, permite proyectar escenarios de intervención, definir estrategias de mantenimiento preventivo y contribuir a una toma de decisiones basada en evidencia. En el caso específico del Aeropuerto AMB, donde actualmente no se cuenta con una base de datos consolidada, el enfoque adoptado se orienta a utilizar referencias metodológicas y criterios regulatorios internacionales, ajustando a las condiciones operativas y normativas vigentes en Chile, con el propósito de construir una propuesta coherente y realista para el contexto nacional, considerando factores como el clima, el tipo de aeronave y el nivel de mantenimiento determinantes para su conservación, (Tofail et al., n.d.). Es por esto que, resulta clave comprender el funcionamiento y operación de la red aeroportuaria y de los organismos que son parte de esta infraestructura.

La infraestructura aeroportuaria nacional es gestionada por diversos organismos públicos con funciones complementarias. La Dirección de Aeropuertos (DAP), dependiente del Ministerio de Obras Públicas, tiene como misión planificar, construir, reparar y mejorar toda la red aeroportuaria del país, asegurando una infraestructura adecuada para fortalecer la conectividad territorial (DAP, 2025). La Junta de Aeronáutica Civil (JAC), a su vez, cumple funciones estratégicas a través de su Concejo y su Secretaría General, orientadas a promover el desarrollo de la aviación comercial tanto a nivel nacional como internacional, (JAC, 2025). Complementariamente, la Dirección General de Aeronáutica Civil (DGAC), bajo control de la Fuerza Aérea de Chile, se encarga de normar y fiscalizar la actividad aérea, garantizando la seguridad de las operaciones aeronáuticas. También administra servicios aeroportuarios, de navegación aérea y meteorología a lo largo del territorio (DGAC, 2025).

Respecto a los tipos de aeronaves, según la normativa DGAC DAN 14 154 (2025), se define una aeronave como todo vehículo que puede sustentarse en la atmósfera por reacciones del aire que no sean las reacciones de este contra la superficie de la tierra, el cual se encuentra en condiciones para el traslado de personas o cosas. Esta definición incluye aviones, helicópteros y planeadores. Su clasificación varía, entre otros factores, por el tipo de motor de propulsión.

El crecimiento sostenido del flujo aéreo nacional ha incrementado las operaciones aeroportuarias, lo que hace indispensable contar con un sistema de mantenimiento eficiente, capaz de organizar la información disponible y apoyar la toma de decisiones en conservación y rehabilitación. Además, dicho sistema debe predecir la evolución de la condición del pavimento a lo largo del tiempo. A esta herramienta se le denomina Sistema de Gestión de Pavimentos Aeroportuarios (SGPA). Un SGPA es un sistema integral que permite planificar, evaluar y gestionar el mantenimiento de los pavimentos aeroportuarios. A través de la integración de bases de datos estructurales, funcionales y de mantenimiento, facilita la toma de decisiones informadas sobre intervenciones y recursos, (Miah et al., 2020). El uso de un SGPA permite priorizar sectores críticos, estimar ciclos de vida, y aplicar metodologías basadas en modelos de deterioro calibrados. La eficacia de este depende en gran medida de la disponibilidad de datos históricos y de la calibración local de los modelos.



Los modelos de desempeño son herramientas fundamentales para predecir el comportamiento futuro de los pavimentos en función de variables operacionales, estructurales, climáticas, entre otras. Según Solminihaç et al. (1998), estos modelos permiten planificar intervenciones de mantenimiento y optimizar la vida útil del pavimento. De acuerdo con Shahid et al. (2025) los modelos de desempeño se clasifican en:

- **Modelos deterministas:** Utilizan funciones matemáticas continuas, como exponenciales o polinomiales, para representar el deterioro.
- **Modelos estocásticos:** Incorporan la incertidumbre mediante técnicas como cadenas de Márkov o simulaciones Monte Carlo.

Ambos modelos utilizan como variables de entrada datos históricos de mantenimiento, tráfico, clima, estructura del pavimento, inventarios y deterioros observados. Los resultados suelen expresarse como valores del PCI, fricción superficial o el momento en el que el pavimento llega al fin de su vida útil.

El PCI es un indicador cuantitativo que describe el estado funcional del pavimento mediante la observación de defectos visibles, equivalente al término *Pavement Condition Index* (PCI) empleado en literatura y reportes técnicos. Este índice, normado bajo la ASTM D6433, varía entre 0 (pavimento completamente deteriorado) y 100 (pavimento en estado óptimo). Su cálculo permite identificar prioridades de intervención y se integra habitualmente en modelos de deterioro y en sistemas de gestión.

La metodología de operación del PCI se fundamenta en la inspección visual de unidades de muestreo representativas, en las cuales se identifican los tipos, severidades y extensiones de los deterioros. Estos se asocian a valores que, combinados, permiten calcular el PCI final mediante una escala estandarizada. El procedimiento considera distintos tipos de fallas según el tipo de pavimento flexible o rígido, incluyendo fisuras, desprendimientos, ahuellamientos y exudaciones, (Shahin, 2005).

## 2.1 Definición del Problema

Considerando la relevancia de AMB y la necesidad de mantener condiciones operativas de alta exigencia, actualmente no es posible desarrollar un modelo propio de deterioro del pavimento para este aeropuerto. Esta limitación se debe, principalmente, a la falta de datos de entrada mínimos que permitan elaborar un modelo confiable. Esta situación contrasta con la de aeropuertos de similar envergadura a nivel internacional, donde existen bases de datos robustas y sistemas de gestión consolidados.

En este contexto, se propone desarrollar un modelo preliminar de deterioro de pavimentos, sustentado en experiencias internacionales, que represente adecuadamente las condiciones operativas de AMB y que, al mismo tiempo, cumpla con los criterios técnicos y normativos nacionales. Para ello, se acota el análisis a aeropuertos norteamericanos, ya que estos comparten con AMB características clave, tales como la variabilidad climática, la magnitud de la infraestructura, la composición del tráfico aéreo en términos de tipo de aeronaves y frecuencia de operación y la estructura de los pavimentos, ya sean asfaltados o de hormigón. Esta similitud permitiría transferir criterios o modelos ya desarrollados y, cuando corresponda, calibrarlos con la evidencia disponible en AMB. Asimismo, la elección de aeropuertos norteamericanos se justifica por la solidez y el grado de desarrollo de las investigaciones en pavimentos aeroportuarios, así como por la existencia de procesos avanzados orientados al mejoramiento de su calidad. A ello se suma la amplia cantidad de aeropuertos disponibles para ser analizados como casos de referencia, lo que amplía las posibilidades de selección y comparación. Si bien no existe una obligación de restringir el análisis exclusivamente a información proveniente de Norteamérica, esta delimitación resulta conveniente para los fines de la investigación. En efecto, dado el alcance acotado del estudio y el tiempo disponible para la recopilación de antecedentes, concentrar la búsqueda en un contexto con abundante información y múltiples casos comparables aparece como la alternativa más adecuada para abordar la problemática planteada.



Por tanto, el problema central consiste en identificar y justificar cuáles aeropuertos pueden constituir referencias válidas para AMB, a partir de criterios explícitos de compatibilidad. Del mismo modo, se requiere priorizar dichos criterios estructurales, operacionales y climáticos con el fin de sustentar una propuesta metodológica capaz de reducir la brecha de datos existente y mejorar la toma de decisiones en la gestión de pavimentos.

## 2.2 Criterios claves a considerar en la propuesta

El tránsito de aeronaves determina la vida útil de los pavimentos aeroportuarios. A diferencia del tránsito urbano, los aviones comerciales y de carga transmiten al pavimento niveles de carga considerablemente más altos, principalmente por su peso máximo al despegue, *Maximum Take-Off Weight* (MTOW) y por el modo en que dichas cargas se reparten a través del tren de aterrizaje. Por ello, una misma estructura puede experimentar respuestas mecánicas muy diferentes según la geometría y configuración del tren, aun cuando el pavimento sea el mismo.

En la evaluación del daño acumulado se emplea el *Pass-to-Coverage Ratio* (P/C), parámetro que relaciona cuántas pasadas se requieren para que la sollicitación produzca una cobertura uniforme sobre el área de pavimento analizada. Este valor está controlado por el *wandering*, es decir, la dispersión lateral de las trayectorias reales de las aeronaves sobre la pista, (FAA, 2025). La repetición de cargas no solo provoca deterioro estructural, sino que también se manifiesta en el desempeño funcional, evidenciándose en mayor índice de rugosidad internacional (IRI) y en la reducción de fricción y textura superficial.

El clima también juega un rol determinante en el deterioro, porque afecta el comportamiento del pavimento tanto desde el punto de vista estructural como funcional. En general, no se trata de un agente que genere fallas por sí mismo, sino de un factor que acelera el proceso: modifica la resistencia y rigidez de los materiales y condiciona la forma en que la estructura responde frente a las cargas del tráfico aéreo.

En cuanto al diseño y desempeño, la elección del tipo de pavimento en un aeropuerto es crítica, ya que influye directamente en la capacidad estructural, la durabilidad y los costos durante el ciclo de vida. En términos generales se distinguen pavimentos rígidos y pavimentos flexibles. Los pavimentos de hormigón suelen asociarse a mayor vida útil y a una mejor respuesta frente a cargas elevadas y concentradas, lo que los hace apropiados para zonas con operación frecuente de aeronaves de gran tonelaje. Además, presentan baja susceptibilidad al ahuellamiento y a la deformación plástica, (FAA, 2025) y su principal limitación suele ser el mayor costo inicial. Por su parte, las estructuras asfálticas requieren una menor inversión inicial y facilitan intervenciones de mantención más rápidas, disminuyendo el tiempo de cierre operativo. No obstante, su comportamiento más flexible las vuelve más propensas a fatiga, fisuración térmica y ahuellamiento en escenarios de altas temperaturas o cargas repetidas intensas (Shahin, 2005). Por esta razón, en muchos aeropuertos se adoptan soluciones combinadas, ajustando la tipología según las exigencias de cada área.

Además de la tipología, la capacidad portante de un pavimento aeroportuario se comunica internacionalmente mediante el *Pavement Classification Number* (PCN), indicador que expresa la resistencia del pavimento para operaciones sin restricciones dentro del sistema ACN-PCN. Este sistema es el mecanismo recomendado y estandarizado para informar la resistencia de pavimentos destinados a aeronaves con masa de plataforma superior a 5.700 kg, permitiendo verificar compatibilidad operacional comparando el efecto de la aeronave *Aircraft Classification Number* (ACN) con la capacidad del pavimento (PCN): en términos generales, si  $ACN \leq PCN$ , la operación es admisible sin restricciones estructurales asociadas a capacidad (Airport Engineering Division AAS, 2014).

El PCN se reporta como un código de cinco partes separadas por “/”, y cada componente entrega información estructural resumida: (i) un valor numérico (magnitud de capacidad), (ii) el tipo de pavimento (R = rígido, F = flexible), (iii) la categoría de subrasante (A, B, C, D, desde alta a muy baja capacidad de soporte), (iv) la categoría de presión de neumáticos admisible (W, X, Y, Z, desde mayor a menor tolerancia), y (v) el método de evaluación (T = evaluación técnica, U = basada en experiencia operacional), (Airport Engineering Division AAS, 2014).



En investigaciones donde no se dispone de información detallada y homogénea sobre espesores, módulos o estratigrafía (situación frecuente al trabajar con múltiples aeropuertos y fuentes públicas), el PCN resulta especialmente útil porque condensa en un solo descriptor la capacidad estructural reportada del pavimento. Por ello, aun cuando no reemplaza una caracterización completa del diseño, el PCN puede emplearse como variable representativa para comparar pavimentos entre aeropuertos y discriminar estructuras con distintas capacidades dentro de un análisis de similitud o transferencia de comportamiento.

Otro tópico utilizado para comprender cómo se relacionan estadísticamente los datos corresponde al método K-Nearest Neighbors (KNN). En esta actividad se empleó este algoritmo no paramétrico, el cual identifica, para cada caso, los  $k$  registros más cercanos en el espacio de variables y asume que las observaciones próximas tienden a presentar comportamientos comparables. Su formulación clásica se origina en la regla del vecino más cercano propuesta por Cover y Hart (1967) para problemas de clasificación. En el ámbito de la ingeniería de pavimentos, KNN ha sido utilizado en aplicaciones de evaluación, tales como la predicción de condición y la comparación de desempeño entre secciones, incluyendo estudios desarrollados sobre bases de datos extensas en los que se contrasta su comportamiento con el de otros algoritmos para caracterizar el estado del pavimento. En el presente estudio, KNN se emplea como una herramienta de similitud orientada a priorizar aeropuertos análogos a AMB. Sin embargo, sus resultados pueden verse influenciados por diversos factores, tales como la elección del valor de  $k$ , la métrica de distancia utilizada, la normalización de las variables, la presencia de datos faltantes y la alta dimensionalidad. Debido a ello, su aplicación se complementa con otros enfoques que permiten reforzar la interpretación de semejanza entre casos y reducir eventuales sesgos en la selección de aeropuertos de referencia. Entre estos enfoques complementarios destaca la similitud del coseno, métrica que evalúa el grado de semejanza entre dos observaciones a partir del ángulo formado entre sus vectores en un espacio multidimensional. A diferencia de las métricas basadas exclusivamente en distancia, la similitud del coseno pone énfasis en la dirección o patrón relativo de las variables más que en su magnitud absoluta, lo que resulta especialmente útil cuando se busca identificar comportamientos estructuralmente parecidos entre aeropuertos, aun cuando existan diferencias de escala entre algunos indicadores. De esta manera, esta técnica permite complementar el análisis de proximidad entregado por KNN, aportando una perspectiva adicional sobre la relación entre los casos estudiados.

De forma complementaria, también se incorpora el uso de técnicas de clustering o agrupamiento, cuyo propósito es identificar conjuntos de observaciones con características similares dentro de una base de datos, sin necesidad de definir previamente categorías fijas. Estas técnicas permiten reconocer patrones generales de agrupación entre aeropuertos según variables estructurales, operacionales y climáticas, facilitando la identificación de grupos homogéneos y entregando una visión más global del comportamiento de los datos. En este sentido, mientras KNN y la similitud del coseno permiten evaluar la cercanía o semejanza entre casos específicos, el clustering contribuye a comprender la estructura general de la muestra, fortaleciendo así la selección de referencias comparables para AMB.

En conjunto, el uso de KNN, la similitud del coseno y las técnicas de clustering conforma una estrategia metodológica complementaria para analizar similitudes entre aeropuertos. Esta combinación permite reducir la dependencia de un único criterio de comparación y proporciona una base más robusta para sustentar la selección de casos análogos en el desarrollo de un modelo preliminar de deterioro de pavimentos aplicable a AMB.

### **3 Objetivos**

#### **3.1 Objetivo general**

Proponer un modelo preliminar de deterioro de pavimento para el Aeropuerto Internacional Arturo Merino Benítez, considerando indicadores como el Índice de Condición del Pavimento y coeficiente de fricción superficial, basado en normativa nacional, condiciones operativas y experiencia internacional, adaptable a escenarios con datos limitados y calibrable a futuro.



### 3.2 Objetivos específicos

1. Identificar y evaluar, a partir de la normativa nacional vigente y de metodologías internacionales aplicadas en aeropuertos con condiciones operativas y climáticas similares a AMB, los criterios técnicos y parámetros más relevantes para la modelación del deterioro de pavimentos aeroportuarios.
2. Analizar las principales limitaciones en la disponibilidad de datos y en los procesos operativos que dificultan el desarrollo de modelos de deterioro del pavimento en el Aeropuerto Internacional Arturo Merino Benítez.
3. Diseñar los componentes clave de una metodología preliminar que permita abordar el deterioro del pavimento en el Aeropuerto Internacional Arturo Merino Benítez, definiendo variables relevantes, criterios de evaluación y posibles fuentes de información para su futura calibración.

## 4 Metodología

La metodología se organiza en tres etapas, Estructura, Tráfico y Clima seguidas de una fase de transferencia, ajuste de modelos y validación interna. Cada etapa se desarrolla mediante actividades concretas, articuladas con los Objetivos Específicos. El enfoque es cuantitativo y comparativo: se construyen bases de datos, se calculan métricas de similitud y se seleccionan análogos con reglas explícitas antes de proponer cualquier modelo de deterioro para AMB.

**Hipótesis de trabajo.** Existen aeropuertos norteamericanos con compatibilidad estructural, operacional y climática suficiente respecto de AMB como para transferir o adaptar modelos de deterioro, obteniendo desempeño aceptable bajo el escenario de datos limitados de AMB.

### 4.1 Supuestos y delimitaciones del estudio

Para asegurar comparabilidad y trazabilidad, el estudio adoptó los siguientes supuestos y delimitaciones:

- Operación considerada: se consideraron únicamente despegues como métrica base de demanda operacional, por coherencia con la información disponible y consistencia entre aeropuertos.
- Horizonte de proyección: todas las proyecciones de comportamiento se expresan a 20 años, de modo de apoyar planificación de conservación con un horizonte fijo.
- Año base para consistencia de flota: se adoptó 2010 como referencia para la definición y validación de aeronaves consideradas, evitando tipos discontinuados o con baja trazabilidad en años anteriores.
- Umbral de aeronaves: se incluyeron solo aeronaves con MTOW > 5.700 kg, excluyendo operaciones livianas cuyo efecto estructural es marginal y cuya trazabilidad suele ser menor en registros públicos.
- PCN de AMB: la clasificación PCN de AMB usada en filtros se basó en los supuestos definidos por el memorista Matías Cárdenas (2024).
- Rugosidad: no se incorporó el análisis de rugosidad por ausencia de información pública trazable y comparable para aeropuertos EE.UU. dentro del caso de estudio.

### 4.2 Etapa 1. Construcción y normalización de bases de datos

**Actividad 1.1** – Selección y limpieza de fuentes norteamericanas. Se recopilan y depuran tres conjuntos: (a) Estructura de pavimentos: Tipo (flexible/mixto), PCN como indicador resumido de capacidad estructural, configuración de capas y espesores (mm).

(b) Tráfico aéreo: Despegues por aeronave y año, MTOW. Periodo de análisis 2014-2022.

(c) Clima: temperatura máxima, temperatura mínima, temperatura media y precipitación mensuales promediadas entre 2006-2020.

Toda la información recopilada de estructura, tráfico y clima se integra en un Excel maestro estructurado por aeropuerto. En este archivo se homogenizan identificadores, unidades y periodos de análisis, de



modo que cada fila corresponde a un aeropuerto y cada columna a una variable relevante para los filtros posteriores (estructura, P/C y clima).

#### Actividad 1.2 – Consolidación de AMB.

Se integra la información disponible de PCI, PCN, fricción, tráfico por pista y clima. Este consolidado se utiliza para diagnosticar brechas (discontinuidades y faltantes) y para definir las ventanas de comparación con el universo norteamericano. Información PCN y el detalle de las secciones en [Anexo 1](#) y la Tabla 1.

**Tabla 1 Secciones por pista de AMB**

AMB	Sección	UM
<b>17R-35L (SCEL)</b>	PIW1	40
	PIW3	22
	PIW5	61
	PIW7	38
<b>17L-35R (SCEL)</b>	PIE1	10
	PIE3	53
	PIE5	71
	PIE7	44
	PIE9	10

Resultado esperado de la Etapa 1. Bases estandarizadas y reproducibles (EE. UU./AMB) que habilitan comparación directa y elaboración de Excel maestro que incorpore toda la información necesaria para su posterior procesamiento.

#### 4.3 Etapa 2. Selección de aeropuertos análogos

El objetivo de esta etapa es reducir el universo de aeropuertos norteamericanos a un conjunto pequeño estructural y operacionalmente comparable con AMB.

##### Actividad 2.1 – Filtro Estructural.

- Variables: Tipo de pavimento, presencia de capas equivalentes a las de AMB y clasificación PCN. Procedimiento: Se construye un índice de similitud estructural que combina (i) coincidencia de tipología (flexible/mixto), (ii) dado que las bases norteamericanas no incluyen espesores de pavimento, la compatibilidad estructural se representa mediante la clasificación PCN disponible tanto para AMB como para los aeropuertos filtrados. Este enfoque aprovecha la información disponible y mantiene coherencia con la práctica aeroportuaria internacional, donde el PCN resume en forma integrada la capacidad estructural del pavimento.

##### Actividad 2.2 – Filtro de Tráfico implementando Pass-to-Coverage Ratio.

- Variables: Despegues anuales por tipo de aeronave y P/C (FAARFIELD), expresando la demanda de daño en coberturas equivalentes.
- Procedimiento: Se calcula el P/C según el tipo de aeronave y la estructura propuesta de pavimento, que en este caso sería utilizar la estructura de AMB para cada pista y traducir la relación entre despegues y P/C en un valor numérico representativo del aeropuerto. Este valor funciona como factor de conversión que resume el efecto combinado de los distintos tipos de aeronaves sobre el pavimento; posteriormente se evalúa la similitud de estos valores dentro del Excel maestro.
- Justificación metodológica: El cálculo del Pass-to-Coverage Ratio (P/C) se realiza en FAARFIELD Figura 1 por separado para la pista asfáltica y la pista mixta de AMB, cargando la flota representativa



de cada pista. Se consideran las aeronaves que representan el 90 % de las operaciones, excluyendo aquellas de muy baja frecuencia.

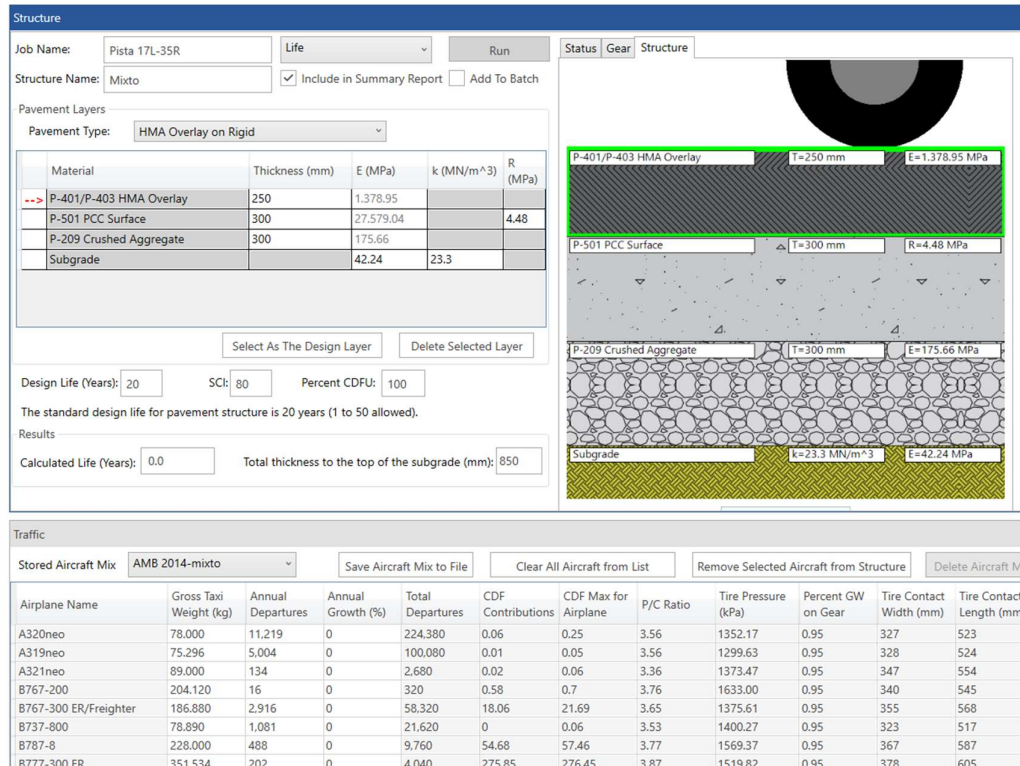


Figura 1. Ejemplificación de uso de FAARFIELD 2.1.1 para modelar pavimentos, P/C.

### Actividad 2.3 – Filtro Climático.

- Variables: temperatura máxima, temperatura mínima, temperatura media y precipitación mensual.
- Procedimiento: Se comparan los perfiles mensuales utilizando los promedios de valores en el rango de años propuesto de cada variable.

### Actividad 2.4 – Identificación de aeropuertos análogos.

- Similitud basada en tráfico (KNN + similitud del coseno): Sobre los vectores de tráfico anual se aplicó un enfoque de vecinos más cercanos (KNN) complementado con similitud del coseno, con el objetivo de generar un conjunto inicial de aeropuertos con patrones de demanda comparables a AMB.
- Agrupamiento multivariable (clustering): Se aplicó clustering (k=4) para incorporar simultáneamente variables de estructura, tráfico y clima y obtener vecindarios comparables por pista, considerando que AMB posee una pista asfáltica y una pista mixta. También se revisaron escenarios complementarios cuando la partición no resultó concluyente bajo cambios de pesos o número de clusters.
- Integración y depuración de candidatos: La unión de candidatos de las distintas pruebas arrojó 26 aeropuertos propuestos. Posteriormente se depuró el conjunto eliminando casos con información insuficiente o inconsistente (por ejemplo, series de tráfico incompletas o valores no concordantes con la lógica de equivalencias). El criterio final de selección se basó en la disponibilidad de reportes de condición PCI aprovechables para construir curvas de deterioro.



#### 4.4 Etapa 3. Transferencia/ajuste de modelos y validación interna

##### Actividad 3.1 – Transferencia de criterios/modelos.

Para cada análogo seleccionado se identifica la práctica de gestión y/o los modelos de deterioro reportados. Para los candidatos depurados, se realizó una búsqueda dirigida de información pública que permitiera construir curvas PCI en el tiempo. En la práctica, solo tres aeropuertos presentaron información suficiente para el análisis final.

Las curvas se construyeron por secciones, considerando la zona central de la pista como el sector crítico de análisis, y relacionando el PCI con el tráfico acumulado, expresado en términos de pasadas equivalentes acumuladas. Para representar esta relación, se ajustó un modelo empírico no lineal basado en antecedentes reportados en la literatura. La calibración de sus parámetros se realizó mediante un proceso de optimización orientado a maximizar el coeficiente de determinación  $R^2$ , el cual se encuentra directamente asociado al grado de ajuste entre la ecuación propuesta y los datos observados. Como resultado de este procedimiento, se obtuvieron los parámetros calibrados para cada situación analizada, según la siguiente expresión:

$$ICP = 100 - \frac{R}{(\ln(\alpha) - \ln(PE_a))^{1/\beta}} \quad (1)$$

Donde  $PE_a$  corresponde a las pasadas efectivas acumuladas (o demanda equivalente acumulada), PCI es el valor inicial del índice al inicio del periodo analizado. Los parámetros  $\alpha$ ,  $\beta$  y  $R$  son coeficientes de calibración:  $\alpha$  controla el nivel del deterioro,  $\beta$  regula la curvatura y  $R$  actúa como parámetro de ajuste del comportamiento no lineal.

Una vez ajustadas las curvas por sección, la calidad del ajuste de los parámetros se evaluó mediante la maximización del coeficiente de determinación  $R^2$  y la minimización de los errores RMSE y MAE. La elección de estos indicadores se fundamenta en que permiten evaluar de manera complementaria el desempeño del modelo:  $R^2$  cuantifica la capacidad explicativa de la ecuación respecto de la variabilidad observada, mientras que el RMSE y el MAE permiten medir la magnitud del error de ajuste en unidades directamente interpretables. Aunque la suma del error cuadrático (SSE) constituye un criterio clásico de optimización, no se reportó como métrica principal debido a que su magnitud depende del número de observaciones y resulta menos intuitiva para comparar resultados entre distintos ajustes. En cambio, el uso conjunto de  $R^2$ , RMSE y MAE proporciona una evaluación más robusta y comprensible del comportamiento del modelo.

Posteriormente, una vez obtenidas las curvas de deterioro para cada sección, se evaluó la consistencia estadística entre ellas mediante la prueba no paramétrica de Kruskal-Wallis, con el propósito de determinar si las distintas secciones de una misma pista podían considerarse provenientes de una misma población en términos de su comportamiento de deterioro. La elección de esta prueba se justifica porque no exige supuestos estrictos de normalidad y resulta adecuada para comparar grupos independientes cuando el tamaño muestral es acotado o cuando la distribución de los datos no puede asumirse como paramétrica. De esta forma, su aplicación permitió sustentar, desde un criterio estadístico, la conveniencia de definir una curva representativa por pista, tanto en los aeropuertos finalistas como en AMB con la información disponible. En consecuencia, la combinación de indicadores de ajuste y pruebas no paramétricas permitió no solo calibrar adecuadamente las curvas de deterioro, sino también verificar si su representación agregada a nivel de pista era metodológicamente consistente.

##### Actividad 3.2 – Ruta alternativa.

Si la etapa 2 no arroja candidatos robustos, se recurre a curvas teóricas de PCI documentadas en la literatura, que se calibran localmente con la evidencia disponible de AMB, explicitando supuestos, sensibilidad y limitaciones.



Otra línea para la aplicación de curvas de deterioro consiste en utilizar modelos de predicción derivados de la herramienta PAVEAIR de la FAA (2025). En este enfoque, se aprovecha información histórica consolidada de múltiples aeropuertos y, a partir de conjuntos de casos con características comparables se obtienen curvas representativas que describen la evolución del PCI en el tiempo. Estas curvas pueden emplearse como referencia para proyectar el deterioro en aeropuertos con disponibilidad limitada de datos locales.

### Actividad 3.3 – Validación interna y análisis.

El desempeño se evalúa con error de ajuste sobre PCI, coherencia temporal con los mantenimientos, revisión experta y análisis de sensibilidad a supuestos críticos. Los resultados se discuten en términos de aplicabilidad operativa, incertidumbre y lineamientos de calibración futura. La compatibilidad entre las curvas propuestas y AMB se evaluó mediante pruebas no paramétricas y de varianza (Kruskal-Wallis, Mann-Whitney, F-test y Brown-Forsythe), además de comparación cualitativa mediante el uso de gráficos. Finalmente, se definió por pista la alternativa con mejor compatibilidad y alcance de validez.

Resultado esperado de la Etapa 3. Propuesta metodológica para AMB sustentada en análogos o, en su defecto, en curvas teóricas calibradas, con criterios de validación y uso claramente documentados.

## 5 Resultados

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos al aplicar la metodología definida en el Capítulo 4, siguiendo una secuencia coherente con las etapas de construcción de bases, selección de análogos y transferencia de curvas. En primer lugar, se consolida la información disponible para AMB y el universo de aeropuertos norteamericanos, definiendo las variables que permiten comparar estructura, tráfico y clima. Luego, se construye un indicador de demanda comparable a través de pasadas equivalentes, lo que habilita la aplicación de métricas de similitud y la obtención de un conjunto depurado de aeropuertos candidatos. Finalmente, se presentan las curvas PCI derivadas desde reportes públicos, sus métricas de ajuste y los contrastes estadísticos que sustentan la compatibilidad o limitaciones de su transferencia hacia AMB, incluyendo una comparación complementaria mediante una curva de referencia tipo PaveAir.

### 5.1 Consolidación de información y definición de variables para AMB y EE.UU.

Con el fin de asegurar trazabilidad y comparabilidad entre AMB y los aeropuertos del universo norteamericano, se estructuró una base maestra en formato tabular, donde cada registro corresponde a un aeropuerto y las columnas representan variables funcionales, estructurales y ambientales relevantes para el análisis. En particular, se incorporaron descriptores de estructura (tipología y clasificación PCN), demanda operacional (tráfico transformado a coberturas equivalentes) y condiciones climáticas, además de la referencia explícita a las fuentes utilizadas. La Tabla 2 resume el conjunto de variables consideradas, sus siglas y la procedencia de los datos.

**Tabla 2. Variables consideradas en la investigación, sus siglas y fuente de donde se obtuvo la información recopilada.**

Variabes consideradas	Siglas	Fuente
Tipo de superficie	ASPH/CONC	FAA
Clasificación PCN	-	FAA
Tipo de pavimento	F/R	FAA
Categoría de la Subrasante	A/B/C/D	FAA
Presión de neumático	W/X/Y/Z	FAA
Método de calculo	T/U	FAA



VARIABLES CONSIDERADAS	SIGLAS	FUENTE
<b>Coberturas equivalentes</b>	P/C	Bureau of Transportation Statistics/FAARFIELD
<b>Temperatura Mínima</b>	Tmin.	U.S. Climate Normals
<b>Temperatura Maxima</b>	Tmax.	U.S. Climate Normals
<b>Temperatura Promedio</b>	Tprom.	U.S. Climate Normals
<b>Precipitación</b>	Precp.	U.S. Climate Normals

Como se observa, las variables estructurales se representan principalmente mediante la clasificación PCN y sus componentes, lo que permite una comparación consistente cuando no se dispone de información homogénea de espesores o estratigrafía para todos los aeropuertos. Por su parte, el componente operacional se expresa mediante coberturas equivalentes (P/C), lo que habilita traducir flotas distintas a un indicador común de solicitud sobre la estructura analizada. Finalmente, el bloque climático incorpora temperaturas mínimas, máxima, promedio y precipitación mensual, variables que permiten contrastar entornos de servicio y apoyar la selección de análogos bajo un criterio multivariable. En el [Anexo 2](#) del presente informe se encuentra toda la información del Excel maestro.

## 5.2 Construcción del indicador de tráfico comparable

Una vez consolidadas las variables, se procedió a estandarizar la demanda operacional con el fin de evitar comparaciones directas basadas exclusivamente en el conteo anual de despegues, dado que este parámetro no captura adecuadamente las diferencias asociadas a la configuración del tren de aterrizaje de las aeronaves ni a la forma en que dicha configuración interactúa con la estructura del pavimento. En consecuencia, el tráfico anual fue transformado en pasadas o coberturas equivalentes mediante factores obtenidos de FAARFIELD, buscando expresar la solicitud de una manera estructuralmente más comparable entre aeropuertos. Para evidenciar el efecto de esta conversión, se presentan a continuación dos vistas del tráfico: primero, el tráfico anual sin equivalencias, en Tabla 3 y luego el mismo tráfico expresado como demanda equivalente mediante P/C, en Tabla 4.

**Tabla 3. Tráfico aéreo sin considerar aplicación de P/C.**

ARPT_NAME	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
<b>AMB 17R-35L</b>	27275	39058	39615	36256	21981	43802	22845	8392	46083
<b>AMB 17L-35R</b>	25142	19569	28290	38917	57978	37685	14704	20166	11538
<b>ORLANDO SANFORD INTL</b>	6787	8137	9363	10524	11150	11778	8018	9599	9284
<b>AUGUSTA RGNL AT BUSH FLD</b>	5176	5152	5024	4965	4965	5384	3722	4896	4598
<b>FLAGSTAFF PULLIAM</b>	2301	2280	2346	1819	1659	2993	2333	3393	2496

**Tabla 4. Tráfico aéreo considerando aplicación de P/C.**

ARPT_NAME	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
<b>AMB 17R-35L</b>	18433	26497	27036	24944	15114	29882	15554	5736	31527
<b>AMB 17L-35R</b>	6955	5330	7814	10816	16347	10615	3913	5435	3128
<b>ORLANDO SANFORD INTL</b>	4423	5285	6116	6831	7270	8353	5591	6699	6489
<b>AUGUSTA RGNL AT BUSH FLD</b>	4829	4855	4637	4507	4423	4753	3000	3991	3664
<b>FLAGSTAFF PULLIAM</b>	2299	2276	2341	1771	1589	2931	2290	3257	2491



La comparación entre ambas tablas permite apreciar que la conversión a P/C no constituye un reajuste uniforme, sino que modifica la magnitud relativa de la demanda según la composición de flota y su efecto estructural sobre el pavimento. En consecuencia, dos aeropuertos con valores similares de despegues pueden presentar demandas equivalentes distintas una vez incorporado el componente de daño relativo. Esta estandarización resulta clave para las etapas posteriores, ya que las pruebas de similitud se apoyan en un indicador que representa de mejor forma la solicitud acumulada que enfrentan las pistas, especialmente cuando se busca transferir curvas PCI en función del tráfico acumulado.

### 5.3 Resultados de similitud: selección inicial y depuración de candidatos

Con la base maestra estructurada, se aplicaron pruebas de similitud para identificar aeropuertos comparables a AMB considerando las variables de estructura, tráfico y clima. El desarrollo efectivo derivó en un enfoque de evaluación combinada y comparación cruzada de resultados, con el objetivo de no descartar prematuramente candidatos potencialmente útiles por falta parcial de información en una dimensión.

Se obtuvo candidatos mediante tres líneas principales:

1. Vecinos más cercanos (KNN) + similitud del coseno, aplicado sobre el vector de tráfico.
2. Clustering (k=4) para diferenciar grupos, obteniendo vecinos cercanos para cada pista de AMB, considerando que una pista es asfáltica y la otra mixta.
3. Resultados complementarios de clustering en escenarios donde la partición no fue concluyente (sensibilidad al número de clusters y/o al peso de variables).

Con el indicador operacional ya expresado en términos comparables, se aplicaron las pruebas de similitud para identificar aeropuertos con patrones de demanda cercanos a AMB y, de manera complementaria, vecindarios multivariantes considerando estructura, tráfico y clima. En este contexto, las Tabla 5 a Tabla 8 sintetizan los resultados de las distintas estrategias: vecinos más cercanos (KNN) y similitud del coseno sobre el tráfico, así como agrupamientos (clustering) diferenciados por pista, atendiendo que AMB opera con una pista asfáltica y otra mixta.

**Tabla 5. Propuestas de aeropuertos obtenidos mediante prueba KNN+ similitud del coseno.**

Prueba 4 Vecinos más cercanos+ similitud del coseno sobre el tráfico						
Código Estatal	Código Alfa	NOMBRE AEROPUERTO	CIUDAD	LATITUD	LONGITUD	TIPO DE SUPERFICIE
AL	MOB	MOBILE RGNL	MOBILE	30.7022888	-88.2539859	ASPH
AZ	FLG	FLAGSTAFF PULLIAM	FLAGSTAFF	35.1312183	-111.678925	ASPH
LA	MLU	MONROE RGNL	MONROE	32.5038533	-92.0456495	ASPH
MS	GLH	GREENVILLE MID-DELTA	GREENVILLE	33.4968725	-90.9820886	ASPH
TX	ABI	ABILENE RGNL	ABILENE	32.4280842	-99.6849194	ASPH

**Tabla 6. Propuestas de aeropuertos obtenidos mediante prueba cluster a pista 17R-35L.**

CLUSTER PISTA 17R-35L						
Código Estatal	Código Alfa	NOMBRE AEROPUERTO	CIUDAD	LATITUD	LONGITUD	TIPO DE SUPERFICIE
CA	SNA	JOHN WAYNE	SANTA ANA	33.67399897	-117.8680515	ASPH
NY	BUF	BUFFALO NIAGARA INTL	BUFFALO	42.93119961	-78.74168472	ASPH
NY	BUF	BUFFALO NIAGARA INTL	BUFFALO	42.94691733	-78.7416935	ASPH
NY	ROC	FREDERICK DOUGLASS	ROCHESTER	43.11616883	-77.67258833	ASPH



Código Estatal	Código Alfa	NOMBRE AEROPUERTO	CLUSTER PISTA 17R-35L			TIPO DE SUPERFICIE
			CIUDAD	LATITUD	LONGITUD	
NC	RDU	RALEIGH-DURHAM INTL	RALEIGH	35.87503108	-78.78267852	ASPH
HI	KOA	ELLISON ONIZUKA	KAILUA-KONA	19.74288	-156.045265	ASPH

**Tabla 7. Propuestas de aeropuertos obtenidos mediante prueba cluster a pista 17L-35R.**

Código Estatal	Código Alfa	NOMBRE AEROPUERTO	CLUSTER PISTA 17L-35R			
			CIUDAD	LATITUD	LONGITUD	TIPO DE SUPERFICIE
CA	VCV	SOUTHERN CALIFORNIA LOGISTICS	VICTORVILLE	34.58270797	-117.3877536	ASPH-CONC
CA	VCV	SOUTHERN CALIFORNIA LOGISTICS	VICTORVILLE	34.61616236	-117.3867309	ASPH-CONC
NJ	WRI	MC GUIRE FLD	WRIGHTSTOWN	40.00357777	-74.598675	ASPH-CONC
TX	SPS	SHEPPARD AFB/WICHITA FALLS MUNI	WICHITA FALLS	34.0062668	-98.49714372	ASPH-CONC
NY	FOK	FRANCIS S GABRESKI	WESTHAMPTON BEACH	40.83623972	-72.63901369	ASPH-CONC

**Tabla 8. Propuestas de aeropuertos obtenidos mediante cluster aplicando resultados complementarios.**

Código Estatal	Código Alfa	NOMBRE AEROPUERTO	CIUDAD	CLUSTER Resultados complementarios		
				LATITUD	LONGITUD	TIPO DE SUPERFICIE
FL	SFB	ORLANDO SANFORD INTL	ORLANDO	28.78173547	- 81.25595477	ASPH
GA	AGS	AUGUSTA RGNL AT BUSH FLD	AUGUSTA	33.36603663	- 81.96923586	ASPH
MI	LAN	CAPITAL REGION INTL	LANSING	42.78192013	- 84.58497516	ASPH
MT	GTF	GREAT FALLS INTL	GREAT FALLS	47.46934305	- 111.3838295	ASPH
NC	ILM	WILMINGTON INTL	WILMINGTON	34.26188411	- 77.91030636	ASPH
NC	ILM	WILMINGTON INTL	WILMINGTON	34.28312711	- 77.91002547	ASPH
TX	MAF	MIDLAND INTL AIR AND SPACE PORT	MIDLAND	31.93170275	- 102.2037509	ASPH
TX	MAF	MIDLAND INTL AIR AND SPACE PORT	MIDLAND	31.94623669	- 102.1974614	ASPH
NC	RDU	RALEIGH-DURHAM INTL	RALEIGH/DURHAM	35.87503108	- 78.78267852	ASPH
HI	KOA	ELLISON ONIZUKA KONA	KAILUA-KONA	19.74288	-156.045265	ASPH

En conjunto, los listados muestran que los aeropuertos candidatos no provienen de una única “ruta” de selección, sino que emergen de coincidencias parciales entre métodos, lo que fortalece la robustez del proceso al reducir la dependencia de un solo criterio. A partir de la unión de resultados se obtuvo un



conjunto inicial de 26 aeropuertos propuestos, el cual posteriormente fue depurado mediante revisión de consistencia y disponibilidad mínima de información. Esta depuración fue determinante para avanzar a la etapa de curvas, dado que la compatibilidad no depende solo de la cercanía operacional o climática, sino también de la trazabilidad temporal de los registros PCI disponibles públicamente.

#### 5.4 Búsqueda de modelos/curvas y selección final de aeropuertos con datos PCI

Luego de identificar los candidatos, se evaluó la viabilidad práctica de construir curvas de deterioro a partir de información pública. Dado que no se encontraron curvas PCI directamente publicadas de forma homogénea para todo el conjunto, el criterio operativo se centró en localizar reportes con mediciones de condición por pista y por secciones, que permitieran reconstruir una serie temporal y, a partir de ella, ajustar curvas PCI. Las Tabla 9 a Tabla 11 presentan los registros recopilados para los aeropuertos que finalmente cumplieron este requisito, incluyendo las secciones de interés y sus unidades muestrales asociadas.

**Tabla 9. Información recopilada de PCI de aeropuerto SFB con las secciones de pista de interés y las correspondientes unidades muestrales.**

Orlando Sanford INTL (SFB) PCI												
Sección pista	Unidad Muestral	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032
6105	150	65	62	60	58	56	55	53	51	49	47	45
6107	23	100	97	95	93	91	89	87	85	83	81	79
6145	6	77	74	72	70	68	67	65	63	61	59	57
6155	13	75	73	71	70	68	67	65	64	62	61	59
6165	28	78	76	74	73	71	70	68	67	65	64	62

**Tabla 10. Información recopilada de PCI de aeropuerto AGS con las secciones de pista de interés y las correspondientes unidades muestrales.**

Augusta Rgnl at Bush Field (AGS) PCI										
Sección pista	Unidad Muestral	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	
10	6	78	73	68	63	58	53	48	48	
20	3	79	74	70	65	60	56	51	51	
25	8	100	95	90	86	81	76	71	71	
30	72	70	68	65	63	60	58	55	55	

**Tabla 11. Información recopilada de PCI de aeropuerto FLG con las secciones de pista de interés y las correspondientes unidades muestrales.**

Flagstaff Pulliam (FLG) PCI																			
Sección Pista	U M	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030
10	210	60	58	56	55	100	97	95	92	90	88	85	83	80	78	75	73	70	67
20	54	67	65	62	58	100	98	97	96	95	94	91	89	86	84	81	79	76	73

Los registros muestran que la disponibilidad temporal varía entre aeropuertos, tanto en extensión como en continuidad. Esta diferencia condiciona directamente el tipo de ajuste posible y el nivel de confianza del modelo empírico resultante. En particular, contar con series por sección permite no solo representar la tendencia global de deterioro, sino también evaluar la consistencia entre unidades muestrales dentro



de una misma pista, lo que resulta esencial para justificar posteriormente la consolidación en una curva representativa. De este modo, la selección final de aeropuertos no respondió únicamente a similitud, sino a la combinación entre compatibilidad y suficiencia de datos PCI explotables. Los planos para ver a detalle las Unidades muestrales se encuentran en el [Anexo 3](#).

### 5.5 Obtención de curvas PCI.

Para construir curvas PCI en función del tiempo y el tráfico, se aplicó una lógica de análisis basada en el procedimiento desarrollado previamente en el trabajo de referencia de Sebastián Rosas (2026) proyecto FONDEF ID23I10113, adaptándolo al contexto y objetivos de esta investigación.

A partir de los registros PCI por sección, se procedió a construir curvas de comportamiento en función del tráfico acumulado, ajustando un modelo empírico no lineal calibrado para reproducir los valores reportados. Para evaluar la calidad del ajuste se emplearon métricas estándar de desempeño  $R^2$ , RMSE y MAE, las cuales permiten cuantificar simultáneamente el grado de explicación del modelo y el error promedio respecto de los datos observados. Con el objetivo de justificar la agregación de secciones a una curva representativa por pista, se aplicó el test Kruskal–Wallis sobre los conjuntos de datos por sección. En términos generales, este contraste permitió evaluar si las secciones podían considerarse estadísticamente comparables para consolidación. Las Tabla 12 a Tabla 14 presentan dichas métricas para cada aeropuerto finalista y sus secciones analizadas.

**Tabla 12. Métricas de ajuste de SFB.**

Orlando Sanford INTL (SFB)					
Sección	6105	6107	6145	6155	6165
$R^2$	0.99	0.95	0.99	1.00	1.00
RMSE	0.71	1.38	0.45	0.30	0.31
MAE	0.55	1.09	0.29	0.26	0.25
Kruskal-Wallis	0.0000040				

**Tabla 13. Métricas de ajuste de AGS.**

Augusta Rgnl at Bush Field (AGS)				
Sección	10	20	25	30
$R^2$	1.00	1.00	0.99	1.00
RMSE	0.95	0.85	1.01	0.59
MAE	0.74	0.62	0.78	0.52
Kruskal-Wallis	0.08462704			

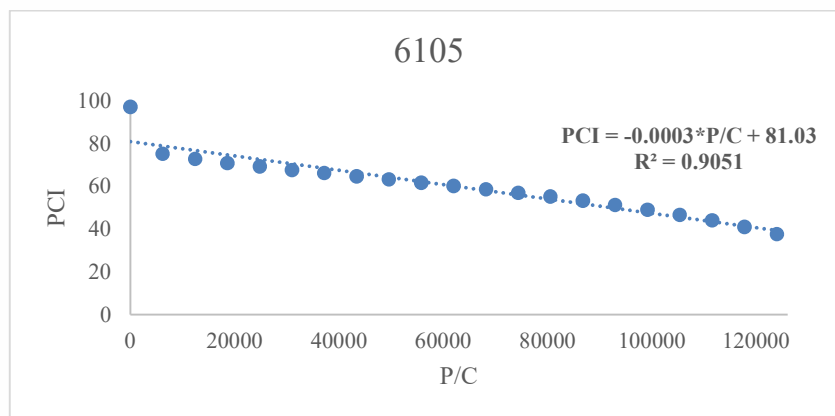
**Tabla 14. Métricas de ajuste de FLG.**

Flagstaff Pulliam (FLG)		
Sección	10	20
$R^2$	1.00	1.00
RMSE	0.64	0.56
MAE	0.52	0.44
Kruskal-Wallis	0.21450715	



En términos generales, los valores elevados de  $R^2$  y los errores bajos RMSE y MAE indican que la formulación “PCI versus tráfico acumulado” es capaz de representar adecuadamente el deterioro observado cuando existe una base temporal suficiente. Adicionalmente, el contraste de Kruskal–Wallis aporta evidencia sobre el grado de homogeneidad entre secciones dentro de cada pista, lo que orienta la decisión de consolidar o interpretar con cautela una curva representativa a nivel de pista. Así, estas métricas no solo respaldan el ajuste, sino que también justifican el nivel de agregación adoptado en la etapa siguiente.

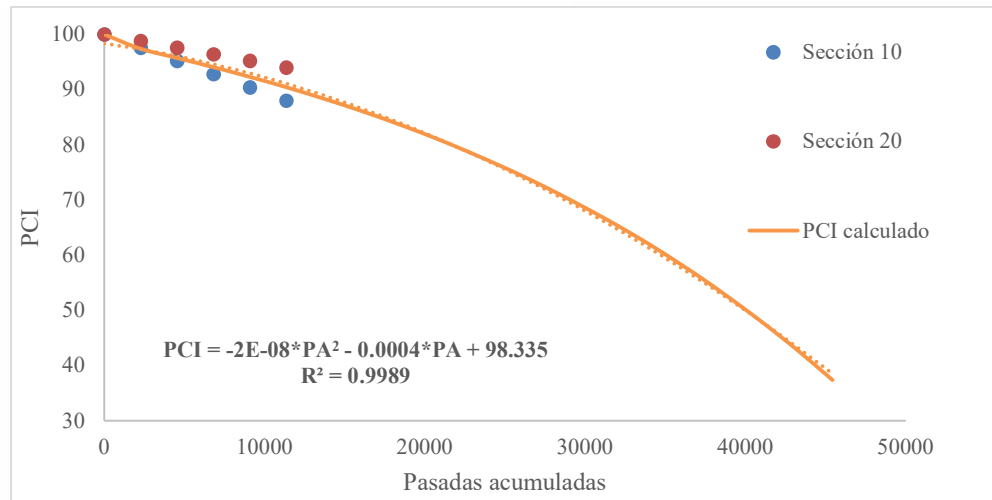
Con el propósito de ilustrar el comportamiento típico a nivel de sección y la relación entre la condición PCI y la demanda acumulada, se presenta a continuación un ejemplo de ajuste para una sección específica. La Figura 2 muestra el caso del aeropuerto SFB en la sección 6105, donde se observa la evolución del PCI conforme aumentan las pasadas equivalentes acumuladas.



**Figura 2. Gráfico PCI vs Pasadas equivalentes acumuladas de SFB específico en la sección 6105.**

En la figura se aprecia una tendencia decreciente del PCI a medida que se incrementa la demanda acumulada, consistente con la expectativa de deterioro progresivo. La dispersión de los puntos y la forma de la curva ajustada permiten visualizar, además, el carácter no lineal del proceso: las pérdidas de condición no necesariamente ocurren a una tasa constante, sino que pueden intensificarse en ciertos rangos de sollicitación. Este tipo de representación es el que posteriormente se utiliza para consolidar curvas por pista y comparar patrones entre aeropuertos. El resto de las curvas se encuentran en el [Anexo 4](#).

Una vez evaluada la coherencia de las secciones, se construyeron curvas representativas por pista, con el objetivo de disponer de una trayectoria única de deterioro que sintetice el comportamiento global del aeropuerto bajo el marco de tráfico acumulado. La Figura 3 presenta un ejemplo de esta consolidación para el aeropuerto FLG, donde se modela la curva representativa a partir de la evidencia por sección.



**Figura 3. Gráfico PCI vs Pasadas equivalentes acumuladas de FLG donde se modela la curva representativa del aeropuerto.**

El ajuste representativo permite visualizar una tendencia global de deterioro y facilita comparaciones directas con otras curvas, especialmente en etapas de transferencia hacia AMB. Al mismo tiempo, este enfoque mantiene el vínculo con la evidencia empírica, ya que la curva consolidada se sustenta en registros de secciones específicas y en una verificación previa de compatibilidad estadística. En consecuencia, la curva por pista funciona como un insumo práctico para la etapa de contraste, sin perder trazabilidad respecto de los datos que la originan. El resto de las curvas se encuentran en el [Anexo 5](#).

### 5.6 Curvas representativas para AMB

En el caso de AMB, la construcción de curvas enfrenta una limitación relevante: la información disponible de PCI se concentra en pocos datos conocidos, estos son las mediciones de FAIC para el año 2014 y las mediciones de IDOM para el año 2022, lo que restringe la calibración directa y aumenta la incertidumbre de la proyección. Aun así, se aplicó el mismo marco de análisis utilizado en los aeropuertos finalistas, con el objetivo de obtener curvas preliminares y evaluar la consistencia entre secciones, particularmente en la zona central de pista. Las Tabla 15 y Tabla 16 resumen las métricas de ajuste por sección para cada pista de AMB y el resultado del contraste de Kruskal–Wallis, utilizado como soporte para la agregación.

A modo de resultado resumen:

- En la pista **AMB 17R-35L**, no se evidenciaron diferencias significativas entre secciones centrales en el período analizado ( $p > 0,05$ ), lo que respalda el uso de una curva representativa consolidada.
- En la pista **AMB 17L-35R**, se observó mayor dispersión entre secciones ( $p$  cercano o menor a 0,05), consistente con la heterogeneidad de materialidad, por lo que la interpretación se realizó con mayor cautela, privilegiando la representatividad de la zona central y el comportamiento por materialidad.

**Tabla 15. Métricas de ajuste de AMB 17R-35L.**

AMB 17R-35L (SCEL)				
Sección	PIW1	PIW3	PIW5	PIW7
<b>R<sup>2</sup></b>	0.73	0.31	-17.57	0.29
<b>RMSE</b>	7.35	6.41	15.42	14.52
<b>MAE</b>	6.56	5.74	13.74	12.96
<b>Kruskal-Wallis</b>	0.246591			

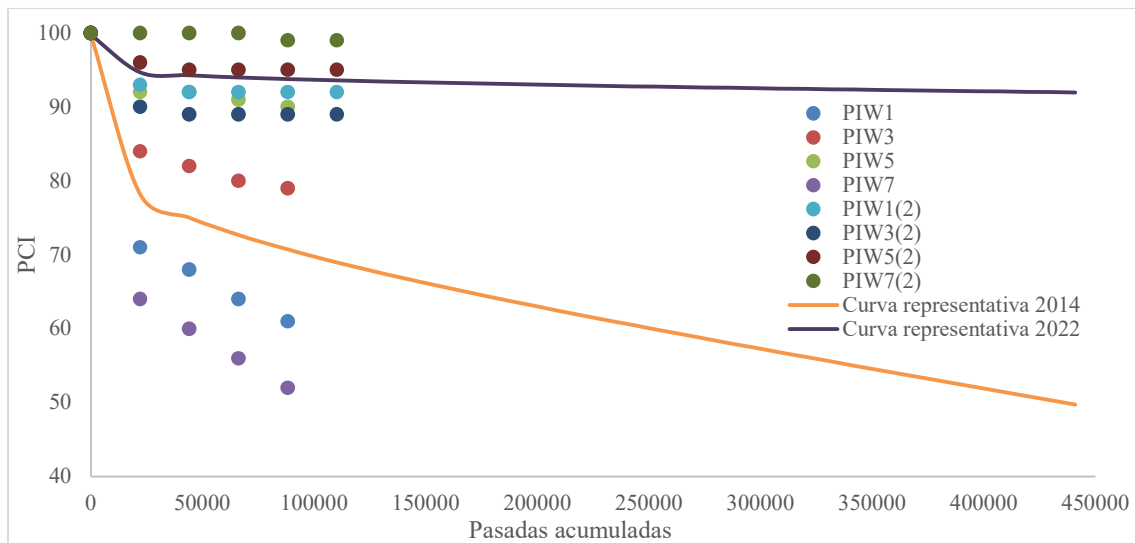


**Tabla 16. Métricas de ajuste de AMB 17L-35R.**

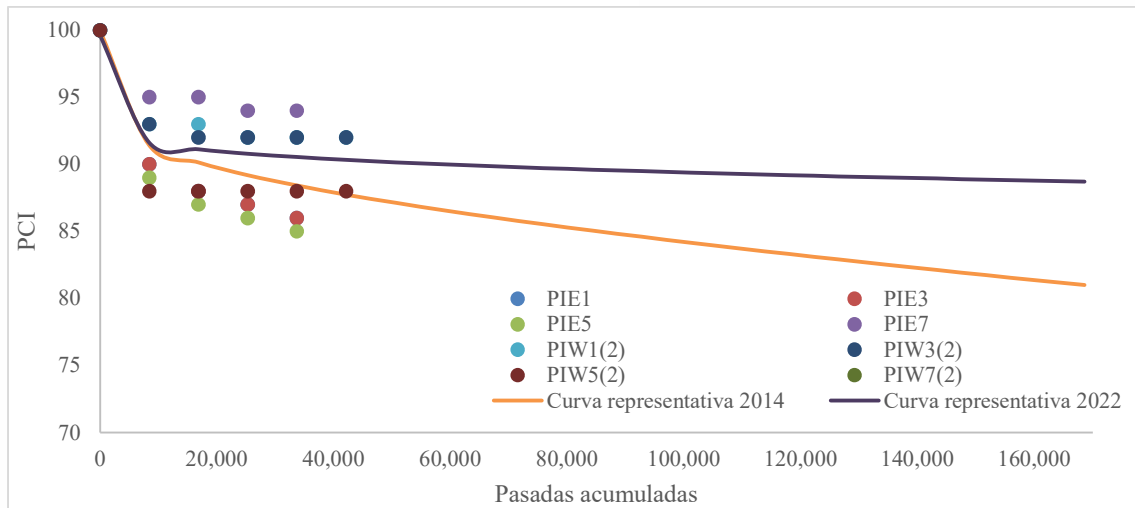
AMB 17L-35R (SCEL)					
Sección	PIE1	PIE3	PIE5	PIE7	PIE9
<b>R<sup>2</sup></b>	0.87	0.87	0.75	-2.59	0.51
<b>RMSE</b>	1.86	1.86	2.75	4.25	2.24
<b>MAE</b>	1.65	1.65	2.45	3.77	1.97
<b>Kruskal-Wallis</b>	0.09680452				

Los resultados reflejan diferencias de comportamiento entre pistas. Para AMB 17R-35L, el contraste sugiere una mayor consistencia entre secciones centrales, lo que respalda el uso de una curva consolidada con fines representativos. En cambio, para AMB 17L-35R se observa una mayor dispersión relativa entre secciones, lo cual es coherente con la heterogeneidad asociada a la materialidad y a posibles intervenciones parciales. En consecuencia, la interpretación posterior se realiza diferenciando por pista y privilegiando la representatividad de la zona central, evitando extrapolar conclusiones uniformes para toda la infraestructura cuando la evidencia sugiere variabilidad interna.

Para complementar el análisis numérico y facilitar la interpretación del deterioro en función de la demanda, se presentan los gráficos de PCI versus pasadas equivalentes acumuladas construidos con la información disponible de AMB. En particular, la Figura 4 corresponde a la pista 17R-35L y la Figura 5 a la pista 17L-35R, mostrando tanto los puntos observados por sección como las curvas representativas obtenidas para los hitos disponibles.



**Figura 4. Gráfico PCI vs Pasadas equivalentes acumuladas de AMB con los datos disponibles pista 17R-35L.**



**Figura 5. Gráfico PCI vs Pasadas equivalentes acumuladas de AMB con los datos disponibles pista 17L-35R.**

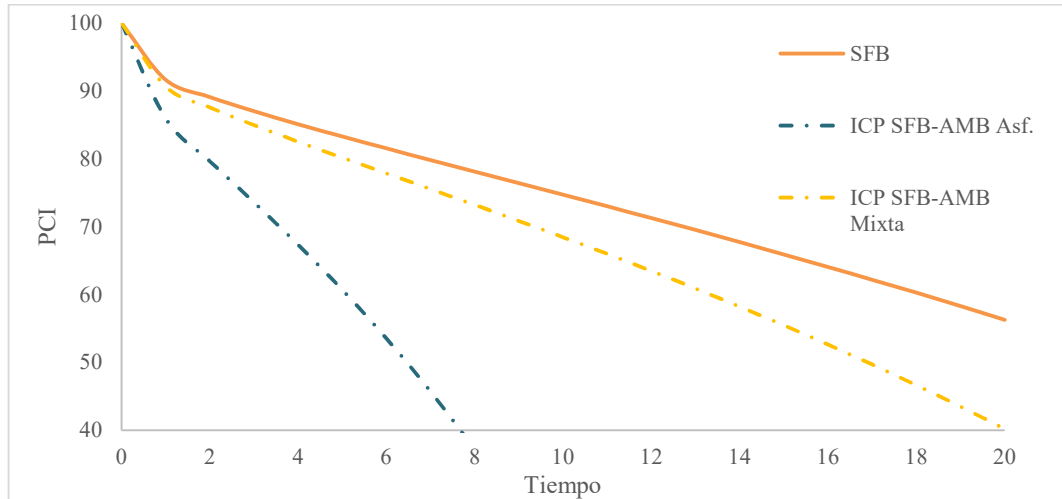
En ambos casos se aprecia que el comportamiento no es estrictamente lineal y que la dispersión entre secciones puede variar según la pista. Este resultado es consistente con la idea de que el deterioro observable mediante PCI se ve influido no solo por la demanda acumulada, sino también por factores locales de materialidad, condición inicial e historial de mantenimiento. Por ello, estos gráficos se utilizan como base para los contrastes posteriores con curvas de aeropuertos finalistas, enfatizando que la compatibilidad debe evaluarse por pista y dentro del horizonte de validez que permiten los hitos disponibles.

### 5.7 Compatibilidad estadística entre curvas AMB vs aeropuertos finalistas

Una vez ajustadas las curvas representativas para los aeropuertos finalistas, se evaluó su compatibilidad con las proyecciones construidas para AMB mediante contrastes estadísticos y comparación gráfica. Este análisis busca determinar si las curvas externas pueden utilizarse como referencia razonable, identificando al mismo tiempo escenarios donde la transferencia produce tendencias demasiado aceleradas o inconsistentes con la evidencia local. Las Figura 6 a la Figura 8 muestran la comparación de PCI versus tiempo utilizando como guía las curvas representativas de SFB, AGS y FLG, respectivamente, mientras que las Tabla 17 a la Tabla 19 sintetizan los resultados de Mann–Whitney, Brown–Forsythe y Kruskal–Wallis para cuantificar similitudes y diferencias entre distribuciones.



Orlando Sanford INTL (SFB):



**Figura 6. Gráfico PCI vs Tiempo donde la curva representativa de SFB se utiliza como guía para obtener las curvas de AMB.**

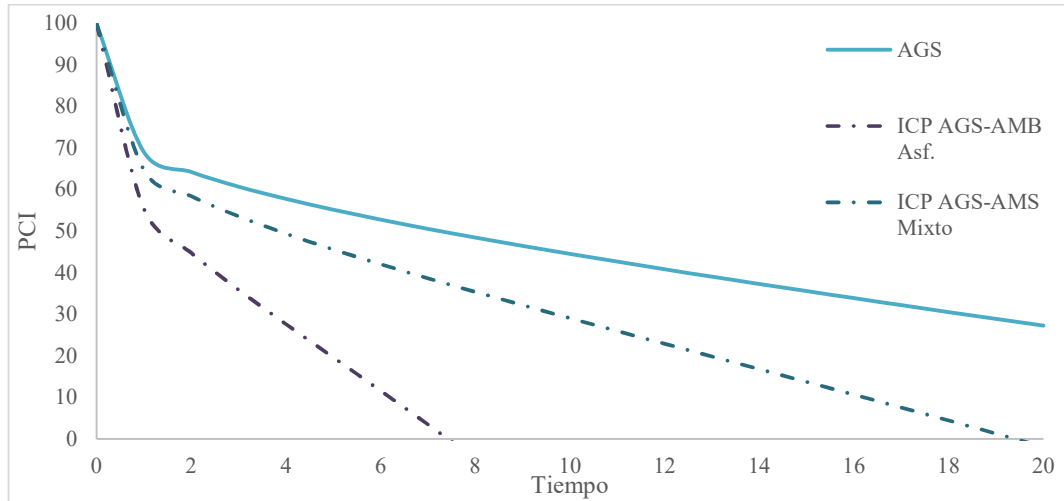
**Tabla 17. Indicadores estadísticos de correlación de AMB vs SFB.**

Orlando Sanford INTL (SFB)				
Sección	PCI AMB Asf.	PCI SFB	PCI AMB Mixto	PCI SFB
<b>Mann-Whitney</b>	0.000073		0.16820152	
<b>Brown-Forsythe Test</b>	0.0003982		0.1239906	
<b>Kruskal-Wallis</b>	0.0001209			

En el caso de SFB, la comparación permite distinguir comportamientos diferenciados según pista de AMB, lo que refuerza la necesidad de evitar una transferencia “única” para toda la infraestructura. En particular, los contrastes estadísticos evidencian escenarios donde la distribución de PCI es compatible en un caso y significativamente distinta en otro, lo que sugiere que la utilidad de la curva depende del tipo de pista y del tramo de análisis considerado. De esta manera, SFB se interpreta como una referencia potencialmente útil para una pista específica, más que como un modelo universal para ambas.



Augusta Rgnl at Bush Field (AGS):



**Figura 7. Gráfico PCI vs Tiempo donde la curva representativa de AGS se utiliza como guía para obtener las curvas de AMB.**

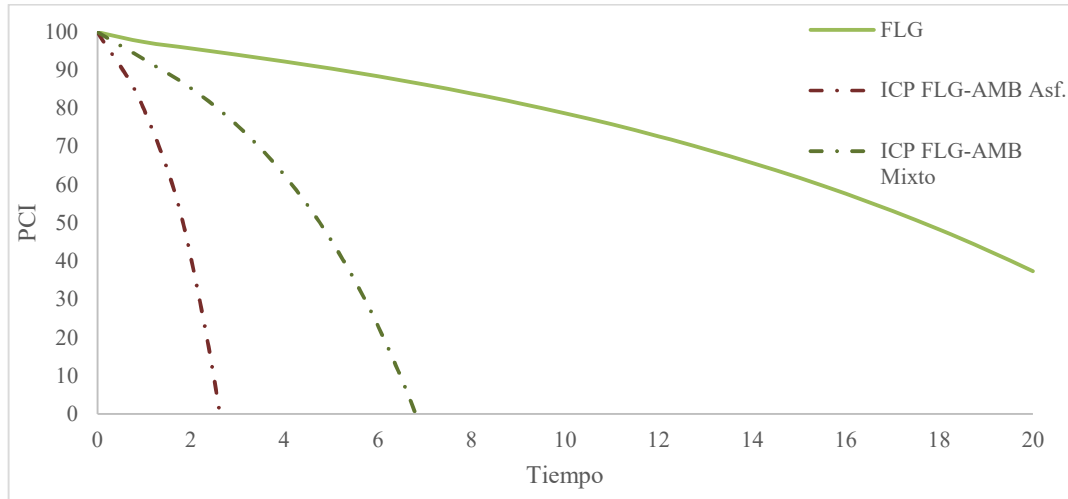
**Tabla 18. Indicadores estadísticos de correlación de AMB vs AGS.**

Augusta Rgnl at Bush Field (AGS)				
Sección	PCI AMB Asf.	PCI AGS	PCI AMB Mixto	PCI AGS
<b>Mann-Whitney</b>	0.0000078		0.01167183	
<b>Brown-Forsythe Test</b>	0.000047		0.02242553	
<b>Kruskal-Wallis</b>	0.000013			

Para AGS, los resultados muestran diferencias estadísticamente significativas en los contrastes, lo que indica que la transferencia directa puede inducir tendencias que no reproducen adecuadamente la condición proyectada de AMB dentro del horizonte evaluado. En consecuencia, su principal aporte se asocia a la comprensión del rango posible de deterioro bajo ciertas condiciones de demanda, más que a su adopción como curva final. Este resultado refuerza la importancia de usar los análogos como referencias comparativas y no como sustitutos automáticos de un modelo calibrado localmente.



Flagstaff Pulliam (FLG):



**Figura 8. Gráfico PCI vs Tiempo donde la curva representativa de FLG se utiliza como guía para obtener las curvas de AMB.**

**Tabla 19. Indicadores estadísticos de correlación de AMB vs FLG.**

Flagstaff Pulliam (FLG)				
Sección	PCI AMB Asf.	PCI FLG	PCI AMB Mixto	PCI FLG
<b>Mann-Whitney</b>	0.00055285		0.000049	
<b>Brown-Forsythe Test</b>	0.30873642		0.01701348	
<b>Kruskal-Wallis</b>	0.000081			

En el caso de FLG, la comparación también sugiere que la compatibilidad no es uniforme para todas las combinaciones, evidenciando diferencias en dispersión y/o tendencia según la pista analizada. Esto se alinea con el diagnóstico previo: AMB presenta heterogeneidad interna y, por tanto, el criterio de selección final debe priorizar la coherencia por pista, la consistencia con los hitos disponibles y la estabilidad del comportamiento proyectado, más que la similitud general del aeropuerto como un todo.

### 5.8 Evaluación con curva PaveAir

Como evaluación complementaria, se incorporó una curva tipo PaveAir, considerando que esta herramienta se reporta como referencia de proyección en prácticas de gestión aeroportuaria y permite disponer de un comportamiento “promedio” construido desde bases históricas amplias. En este caso, la curva se aplicó sobre el tráfico equivalente de AMB para generar una trayectoria de PCI proyectado, la cual se contrasta con los hitos disponibles de condición en AMB. La Figura 9 muestra la comparación entre la curva PaveAir y los puntos de PCI disponibles, mientras que la Tabla 20 de indicadores estadísticos resume el grado de compatibilidad alcanzado en cada hito.

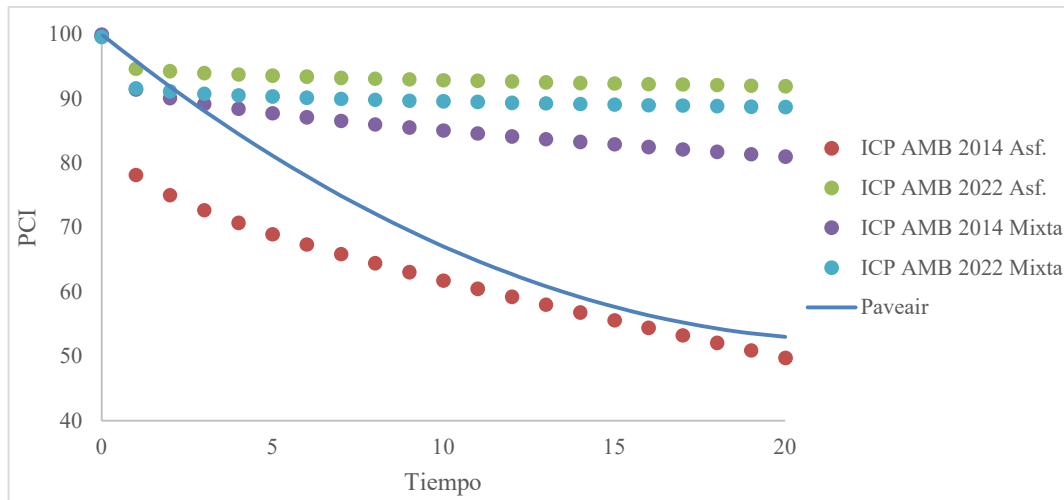


Figura 9. Gráfico PCI vs Tiempo donde la curva de PAVEAIR se utiliza para comparar los resultados proyectados con la información existente de AMB (PAVEAIR, 2026).

Tabla 20. Indicadores estadísticos de correlación de PAVEAIR vs AMB.

PAVEAIR								
Sección	PCI AMB Asf. 2014	PCI PaveAir	PCI AMB Mixto 2014	PCI PaveAir	PCI AMB Asf. 2022	PCI PaveAir	PCI AMB Mixto 2022	PCI PaveAir
<b>Mann-Whitney</b>	0.16820152		0.00053335		0.00000090		0.000022	
<b>Brown-Forsythe Test</b>	0.10666434		0.0000001		0.0000008		0.000000041	
<b>Kruskal-Wallis</b>	0.00000000000008							

La comparación evidencia que el desempeño de la curva PaveAir no es homogéneo a lo largo del horizonte: puede representar razonablemente el estado en un hito inicial, pero perder consistencia al contrastarse con un hito posterior, lo que sugiere sensibilidad a diferencias de mantenimiento, materialidad o condiciones locales no capturadas por una curva genérica. En consecuencia, su uso se justifica como referencia inicial para la pista asfáltica bajo el primer anclaje disponible, pero requiere recalibración local si se busca representatividad estable en todo el período. Para la pista mixta, el análisis basado en secciones y análogos mantiene mayor coherencia interpretativa, especialmente cuando el comportamiento funcional está dominado por sectores asfálticos y por variabilidad interna entre tramos.

## 6 Análisis de resultados

Los resultados confirman que el principal condicionante metodológico fue la limitación de información histórica de AMB para construir un modelo propio completamente calibrado. Bajo este escenario, la estrategia de transferencia desde aeropuertos EE.UU. se justifica, pero introduce restricciones inevitables: diferencias en régimen operacional, prácticas de mantenimiento, políticas de inspección y criterios de levantamiento PCI.



La conversión del tráfico a pasadas equivalentes permitió homogenizar el efecto de flotas distintas, pero no elimina completamente la sensibilidad del deterioro a factores que no siempre se capturan en bases públicas, por ejemplo: mantenimiento oportuno, intervenciones parciales, calidad constructiva, condiciones locales de drenaje, y microclima. En particular, la diferencia de desempeño entre pistas en AMB sugiere que la heterogeneidad de materialidad y las intervenciones parciales condicionan fuertemente la forma de la curva, por lo que resulta razonable que un único modelo “genérico” no reproduzca ambos comportamientos con igual calidad.

La buena calidad estadística de los ajustes en aeropuertos finalistas,  $R^2$  alto y errores bajos, valida que el marco “PCI vs tráfico acumulado” es consistente para describir deterioro cuando existe información suficiente. Sin embargo, la comparación entre curvas y AMB muestra que la compatibilidad debe entenderse como dependiente del horizonte temporal y de la información disponible, como lo son, informes FAIC (2014) vs IDOM (2022), reforzando la necesidad de incorporar mediciones adicionales de AMB para estabilizar decisiones.

Los supuestos de considerar solo despegues y filtrar aeronaves por  $MTOW > 5.700$  kg mejoran la trazabilidad y reducen ruido, pero podrían infravalorar escenarios donde aterrizajes u operaciones livianas tengan participación relevante. Asimismo, adoptar 2010 como referencia de flota a considerar, minimiza inconsistencias por aeronaves discontinuadas, pero restringe la reconstrucción histórica previa. Finalmente, la aproximación de la pista mixta como equivalente a flexible es válida para el propósito de transferencia de curvas PCI en sectores asfálticos, aunque futuras calibraciones debieran diferenciar explícitamente por materialidad y estratos.

## 7 Implicancia de normativa nacional

Esta investigación propone curvas y criterios de proyección del estado del pavimento como insumo para gestión. Para que estas proyecciones sean aplicables en un contexto real, deben alinearse con exigencias nacionales asociadas a operación segura, mantenimiento y reporte de condición de pistas.

### 7.1 Rozamiento: obligación de medición y publicación (DAR-14 / DS 173)

El marco nacional establece explícitamente que se debe medir y publicar el coeficiente de rozamiento de pistas en aeródromos usados regularmente por transporte comercial, mediante un dispositivo de medición continua, y bajo supervisión técnica de la DGAC. Además, el reglamento indica que una pista mojada (o parte de ella) puede considerarse resbaladiza si las mediciones muestran características de rozamiento inferiores al nivel mínimo especificado por la DGAC.

Implicancia para AMB y para la presente investigación: aunque el análisis principal se centró en PCI, condición superficial y funcional, la normativa refuerza que cualquier estrategia de mantenimiento y programación de intervenciones debe considerar, como mínimo, el control del rozamiento y su reporte operacional.

### 7.2 Requerimientos DGAC para mantenimiento de pavimentos y rugosidad (DAN 14 153)

La DAN 14 153 incorpora un capítulo específico de rugosidad de superficies, lo que refuerza que la condición funcional no se limita a PCI: irregularidades y discontinuidades afectan seguridad/operación y deben ser gestionadas como parte de la condición del pavimento.

Implicancia directa para esta memoria: en el caso de AMB no fue posible incorporar rugosidad por falta de datos públicos comparables para aeropuertos EE.UU. Por lo tanto, se recomienda que el modelo propuesto, curvas PCI se use como un componente dentro de un esquema más amplio de gestión,



complementándolo con campañas de medición de rozamiento y rugosidad según lo exige la normativa DGAC.

### 7.3 PCI como herramienta de gestión en Chile

En Chile, la Dirección de Aeropuertos dispone procedimientos donde la evaluación de condición de pavimentos aeroportuarios mediante metodología PCI se enmarca en la normativa ASTM D5340, incluyendo etapas desde recopilación de antecedentes hasta entrega de informe final. Adicionalmente, documentos de gestión de la Red Primaria destacan el PCI como elemento basal para priorización de conservación, describiendo la lógica de división del área de movimiento en ramas, secciones características y unidades de muestra, conforme a ASTM D5340.

Aplicación a resultados de la investigación:

- Las curvas PCI propuestas para AMB pueden utilizarse como insumo para programar inspecciones PCI y anticipar rangos de condición.
- La recomendación operativa es alinear la implementación a la lógica MOP, ramas, secciones y unidades de muestra, de manera que nuevas campañas PCI permitan recalibrar la curva recomendada y convertirla en una herramienta robusta de planificación.

### 7.4 Limitación crítica: rugosidad

Si bien la normativa DGAC considera explícitamente la rugosidad y el rozamiento como parte del desempeño funcional, en esta investigación no fue posible desarrollar el componente de rugosidad por ausencia de datos comparables de aeropuertos EE.UU. para el caso de estudio. En consecuencia, la aplicabilidad final del modelo debe entenderse como una proyección del estado tipo PCI, recomendándose incorporar en el corto plazo campañas de medición de rugosidad y rozamiento para completar el marco normativo y operacional.

## 8 Conclusión

En esta investigación se abordó la propuesta de obtener un modelo de deterioro de pavimentos del Aeropuerto Internacional Arturo Merino Benítez en un escenario donde la información histórica pública disponible no permite una calibración directa y robusta de un modelo local a lo largo de todo el horizonte de análisis. En consecuencia, se propuso y aplicó una metodología preliminar de transferencia por similitud, orientada a derivar curvas de deterioro basadas en PCI a partir de aeropuertos norteamericanos con registros más completos, asegurando una compatibilidad técnica mínima mediante criterios objetivos de comparación.

Bajo ese marco, se estructuró el análisis considerando los componentes que gobiernan el deterioro y que permiten la comparación entre infraestructuras: demanda operacional, PCI, capacidad estructural y condiciones del entorno. Un elemento metodológico central fue la transformación del tráfico anual a un indicador de pasadas equivalentes, lo que permitió homogeneizar aeropuertos con flotas distintas y traducir la demanda a una variable anual comparable con AMB. Esta conversión resultó determinante para sostener el análisis estadístico posterior y para construir curvas coherentes con el enfoque “PCI versus tráfico acumulado”.

Con la demanda estandarizada, la aplicación de pruebas de similitud, KNN más similitud del coseno sobre tráfico y de clusterización multivariable permitió identificar un conjunto inicial de 26 aeropuertos candidatos. Sin embargo, la depuración evidenció que la restricción principal no se vinculó con la identificación de casos comparables, sino con la disponibilidad efectiva de datos PCI explotables en fuentes públicas. En definitiva, solo tres aeropuertos contaron con información suficiente para construir curvas y avanzar hacia instancias de contraste y validación.



A partir de los aeropuertos finalistas, el ajuste de un modelo empírico no lineal permitió obtener curvas de deterioro PCI asociadas al tráfico acumulado. Los indicadores de desempeño  $R^2$ , RMSE y MAE mostraron, en términos generales, una consistencia adecuada entre el modelo y los valores reportados, lo que respalda la pertinencia del enfoque cuando existe información suficiente y homogénea para su implementación.

El contraste estadístico y gráfico entre las curvas derivadas y las proyecciones de AMB indicó que un único modelo no representa de forma robusta el comportamiento de ambas pistas, debido a diferencias atribuibles a la materialidad y a la heterogeneidad por sectores, particularmente en la pista mixta. En consecuencia, la recomendación debe formularse por pista y atendiendo el alcance temporal de validez del ajuste. En la pista asfáltica, la curva de referencia de PaveAir presentó un desempeño aceptable al contrastarse con los datos recopilados por FAIC (2014), pero un desempeño insuficiente frente a un antecedente posterior de IDOM (2022), lo que sugiere que su uso sin recalibración es parcial. Para la pista mixta, en cambio, el enfoque basado en aeropuertos propuestos y análisis por secciones centrales mostró mayor coherencia con el comportamiento proyectado, especialmente en sectores asfálticos. En particular, para la pista superior AMB 17R–35L (SCEL), la comparación favoreció la curva de PaveAir para 2014, con valores de significancia aceptables como, Mann–Whitney = 0.168 y Brown–Forsythe = 0.107, mientras que para la pista inferior AMB 17L–35R (SCEL) el mejor desempeño comparativo se obtuvo al transferir la curva derivada del aeropuerto SFB, sugiriendo mayor compatibilidad con la condición y el comportamiento de los tramos asfálticos analizados.

Finalmente, la propuesta de curvas PCI constituye un apoyo consistente para gestión y planificación; sin embargo, debe entenderse como un componente dentro de un sistema de gestión más amplio, dado que la normativa nacional exige complementar la evaluación con control operacional, particularmente en rozamiento y, cuando corresponda, rugosidad. En este sentido, no fue posible integrar la rugosidad por ausencia de información pública comparable en los aeropuertos de referencia, por lo que los resultados se circunscriben a condición tipo PCI y su relación con la demanda, la estructura y el entorno.

En síntesis, si bien la información disponible para AMB no permitió desarrollar un modelo propio de deterioro con calibración directa para todo el horizonte, la metodología aplicada permitió establecer una aproximación preliminar sustentada en transferencia por similitud y ajuste empírico, proponiendo curvas diferenciadas por pista y con respaldo estadístico en los hitos analizados. De este modo, se cumple el propósito general de disponer de una base técnica inicial para estimar el deterioro en AMB bajo datos limitados, quedando como condición para fortalecer y consolidar el modelo la incorporación sistemática de nuevos levantamientos de condición, el registro trazable de intervenciones y la disponibilidad de variables funcionales complementarias exigidas por la operación.

## 9 Recomendaciones y trabajos futuros

Para robustecer la calibración, se recomienda aumentar el número de mediciones PCI en AMB, idealmente con una periodicidad regular, por ejemplo cada 6 a 12 meses, dependiendo de la intensidad de operación y de la factibilidad de inspección. Contar con evaluaciones espaciadas en intervalos relativamente constantes permite seguir con mayor continuidad la evolución del deterioro y reducir la incertidumbre asociada a largos períodos sin información. De este modo, sería posible anclar la curva en más de dos hitos, es decir, disponer de un mayor número de puntos observados de PCI en distintos momentos del tiempo, a partir de los cuales ajustar y validar con mayor precisión la trayectoria de deterioro del pavimento.

Para interpretar correctamente cambios de pendiente en curvas PCI, es indispensable integrar antecedentes de intervenciones, recapados, sellos, bacheos, reconstrucción parcial, etc. Esto es especialmente crítico en la pista mixta.

Se recomienda implementar y actualizar campañas de medición de rozamiento con dispositivos de medición continua y, cuando corresponda, evaluación de rugosidad, para que la gestión del pavimento cumpla requerimientos DGAC y complemente el enfoque PCI.



Como mejora, se sugiere evaluar sensibilidad del modelo frente a variables climáticas no promediadas y verificar si el clima aporta discriminación adicional en la selección de análogos.

El cuello de botella principal fue la disponibilidad de reportes explotables. Una línea futura de estudio es ampliar la búsqueda a otras jurisdicciones o repositorios, priorizando aquellos con series temporales de PCI publicadas.

La obtención de curvas de deterioro PCI en función del tráfico equivalente, permite anticipar la evolución del pavimento y, por tanto, apoyar decisiones de conservación preventiva en lugar de intervenciones reactivas, que usualmente implican mayores costos, mayor afectación operacional y menor capacidad de programación.

Se recomienda utilizar las curvas proyectadas como insumo para un plan de conservación preventiva con horizonte de 20 años, ajustando la curva a medida que se incorporen nuevas mediciones PCI.

## 10 Referencias

- A Airport Engineering Division A A S, F. A. (2014). *Advisory Circular (A C) 150/5335-5C, Standardized Method of Reporting Airport Pavement Strength - PCN, 14 August 2014.*
- Amunategui, S., aia, S. A. + A. B. A., Barreau, C., Smith, S., & Vidal, L. (2018). *Aeropuerto Arturo Merino Benítez.* <http://hdl.handle.net/11447/6039>
- DAP. (2025, May 22). *Dirección de Aeropuertos.* <https://aeropuertos.mop.gob.cl/direccion-de-aeropuertos/>
- DGAC. (2025, May 22). *Dirección General de Aeronáutica Civil.* <https://www.dgac.gob.cl/aeropuertos/red-aeroportuaria-nacional/red-aeroportuaria/>
- DGAC DAN 14 154. (2025, May 23). 09 Mayo 2023. [https://www.dgac.gob.cl/wp-content/uploads/2024/08/DAN-14\\_154\\_ED1ENM1\\_09MAYO2023.pdf](https://www.dgac.gob.cl/wp-content/uploads/2024/08/DAN-14_154_ED1ENM1_09MAYO2023.pdf)
- FAA. (2025). AC 150/5320-12C - Measurement, Construction, and Maintenance of Skid Resistant Airport Pavement Surfaces. [https://www.faa.gov/airports/resources/advisory\\_circulars/index.cfm/go/document.information/documentNumber/150\\_5320-12C?utm\\_source=chatgpt.com](https://www.faa.gov/airports/resources/advisory_circulars/index.cfm/go/document.information/documentNumber/150_5320-12C?utm_source=chatgpt.com)
- IDOM. (2022). *EVALUACIÓN DEL ESTADO DE LOS PAVIMENTOS POR MÉTODO PCI AP. ARTURO MERINO BENÍTEZ.*
- Junta de Aeronáutica Civil. (2024, December). *Informe Resumen estadístico .* <https://www.jac.gob.cl/wp-content/uploads/2025/01/202412-Informe.pdf>
- Miah, M. T., Oh, E., Chai, G., & Bell, P. (2020). An overview of the airport pavement management systems (APMS). *International Journal of Pavement Research and Technology, 13*(6), 581–590. <https://doi.org/10.1007/s42947-020-6011-8>
- Roh, S., Lee, J., Urbino, I. J., Lin, W., & Cho, Y. (2023). Airport Pavement Maintenance Decision-Making System with Condition Cases Optimization. *Applied Sciences 2023, Vol. 13, Page 13167, 13*(24), 13167. <https://doi.org/10.3390/APP132413167>
- Shahid, C. S., Zainal, Z. A., Yusoff, N. I. M., Mohammad, N., Zamzuri, Z. H., & Widyatmoko, I. (2025). Stochastic-based pavement performance and deterioration models: A review of techniques and applications. *Alexandria Engineering Journal, 120*, 420–437. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2025.02.033>
- Shahin, M. Y. (2005). *Pavement Management for Airports, Roads, and Parking Lots.* Springer US. <https://doi.org/10.1007/b101538>



UNIVERSIDAD TECNICA  
FEDERICO SANTA MARIA

Solminihaç, H., Salsilli M., R., Covarrubias T., J. P., & Vidal M., M. (1997). Desarrollo de modelos de deterioro incrementales de segunda fase para pavimentos de hormigón. *Revista Ingeniería de Construcción*, (17), 34–46. <https://ojs.uc.cl/index.php/ric/article/view/17415>

The world bank. (2020). *Air transport*. <https://documents1.worldbank.org/curated/en/839601631518964272/pdf/Air-Transport-Annual-Report-2020.pdf>

Tofail, M. M., Oh, E., Chai, G., & Bell, P. (n.d.). *An overview of the airport pavement management systems (APMS)*. <https://doi.org/10.1007/s42947-020-6011-8>

## 11 Anexos

### Anexo 1: AMB

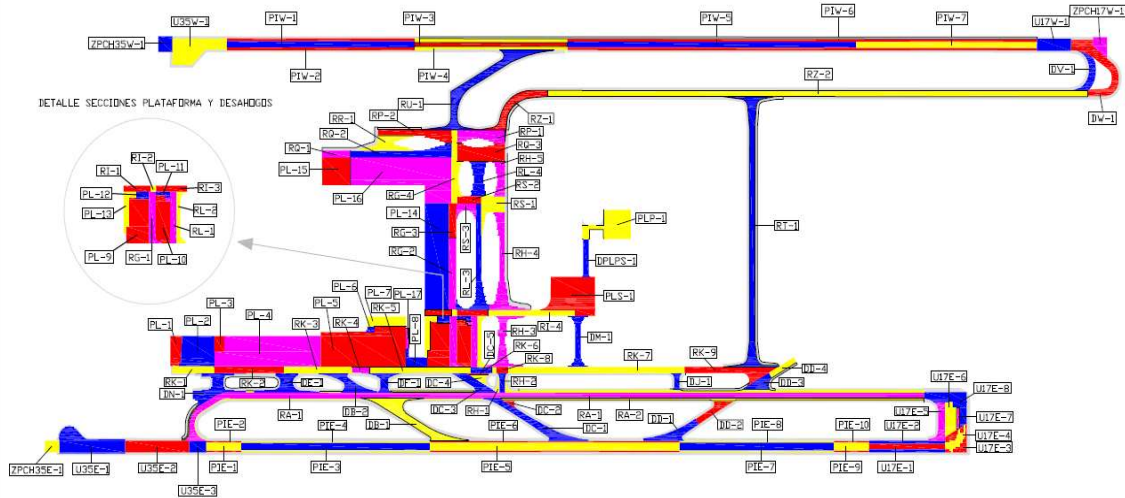


Figura 10. Detalle secciones de AMB (IDOM, 2022).

Tabla 21. Estructura del pavimento más clasificación PCN (Matias Cardenas, 2025).

SECCIÓN	TIPO DE PAVIMENTO	ESTRUCTURA DEL PAVIMENTO					PCN	
		ASFALTO [mm]	HORMIGÓN [mm]	R [Mpa]	BASE [mm]	SUBBASE [mm]	MEJOR. [mm]	COMBINACIÓN
Pista 17L-35R	COMPUESTO	250	300	4.48	-	300	400	63 / F / B / W / T
Pista 17R-35L	ASFALTO	150	-	-	360	-	2000	115 / F / D / W / T
RA-2	RÍGIDO	-	400	4.48	-	300	400	63 / R / B / W / T
RT	ASFALTO	160	-	-	360	-	2000	63 / R / B / W / T
PL-A	RÍGIDO	-	390	4.48	-	300	500	63 / R / B / W / T

### Anexo 2: Base de datos Excel maestro

La base completa de aeropuertos EE.UU. más AMB se entrega como archivo digital en formato .xlsx y se referencia como [Anexo Digital AD-1](#).





Figura 13. Detalle secciones de FLG (ADOT, 2022).

Anexo 4: Gráfico de curvas por sección

Orlando Sanford INTL (SFB):

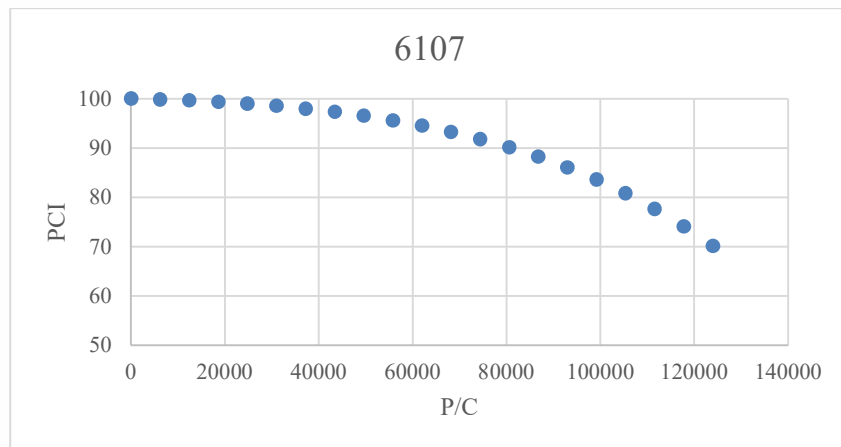


Figura 14. Curva PCI vs Pasadas acumuladas de SFB sección 6107.

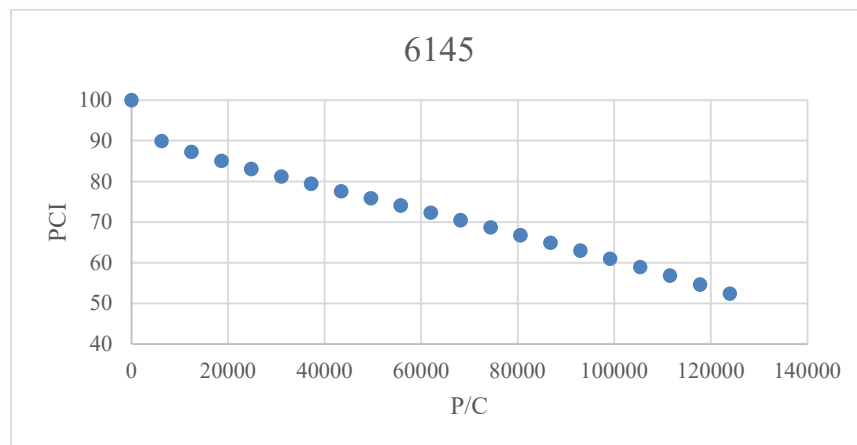
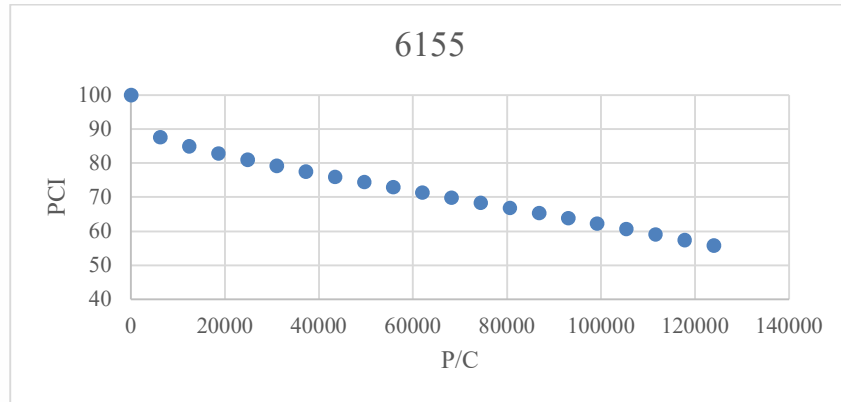
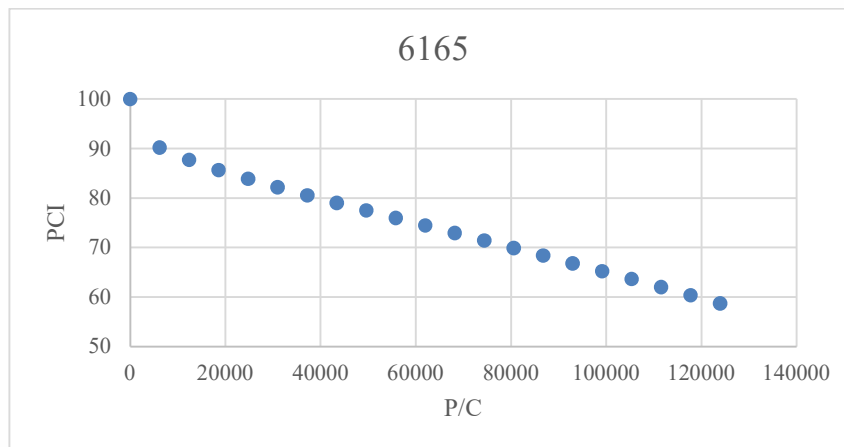


Figura 15. Curva PCI vs Pasadas acumuladas de SFB sección 6145.

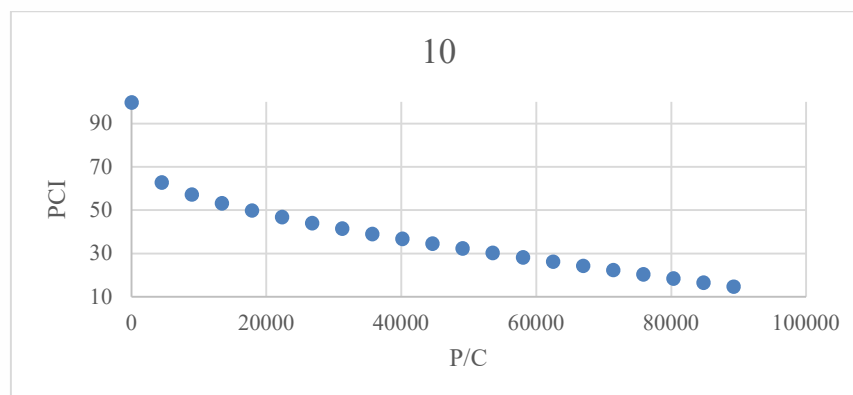


**Figura 16. Curva PCI vs Pasadas acumuladas de SFB sección 6155.**



**Figura 17. Curva PCI vs Pasadas acumuladas de SFB sección 6165.**

Augusta Rgnl at Bush Field (AGS):



**Figura 18. Curva PCI vs Pasadas acumuladas de AGS sección 10.**

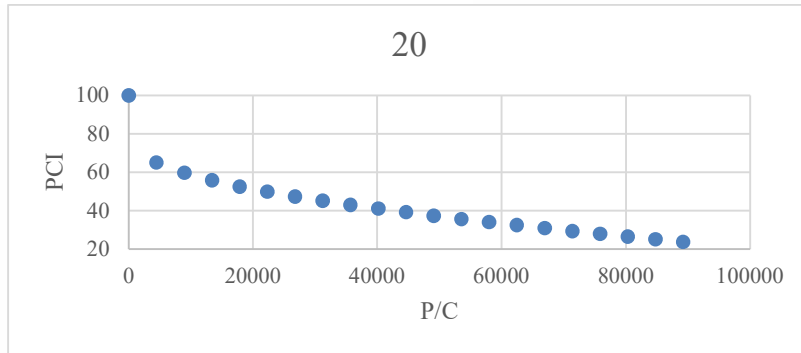


Figura 19. Curva PCI vs Pasadas acumuladas de AGS sección 20.

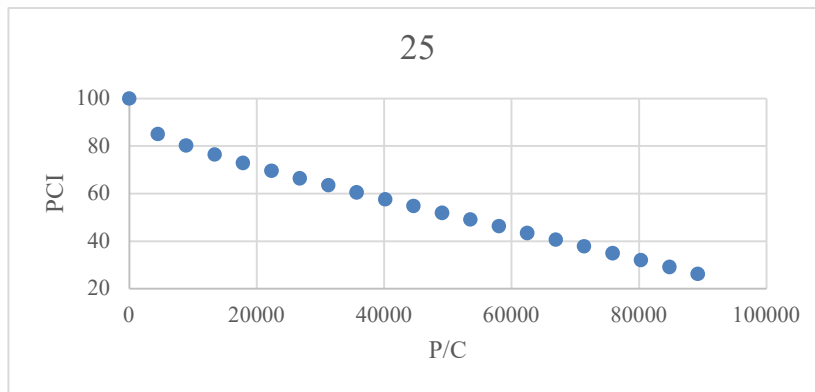


Figura 20. Curva PCI vs Pasadas acumuladas de AGS sección 25.

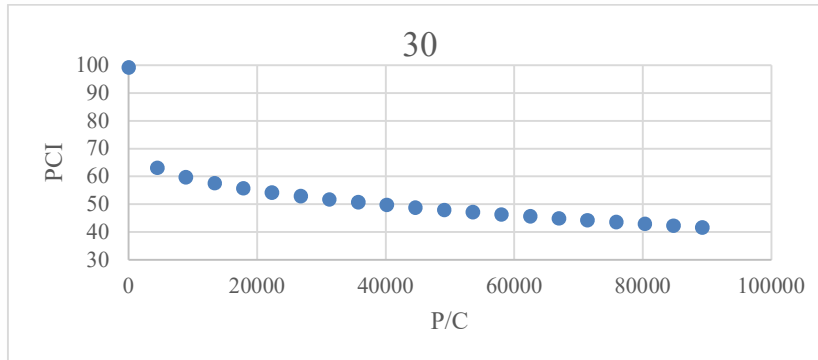


Figura 21. Curva PCI vs Pasadas acumuladas de AGS sección 30.



Flagstaff Pulliam (FLG):

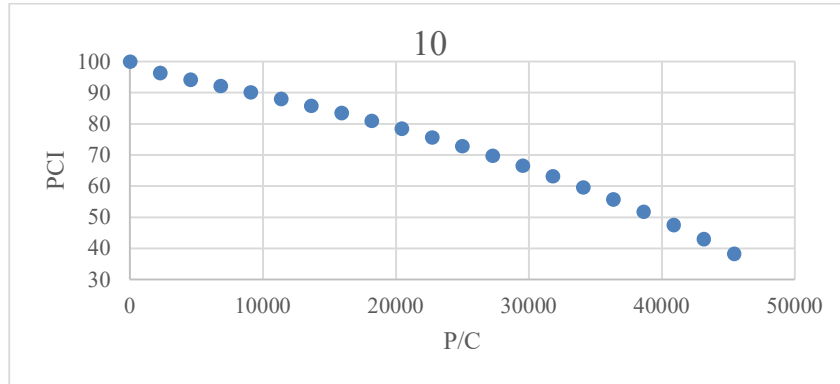


Figura 22. Curva PCI vs Pasadas acumuladas de FLG sección 10.

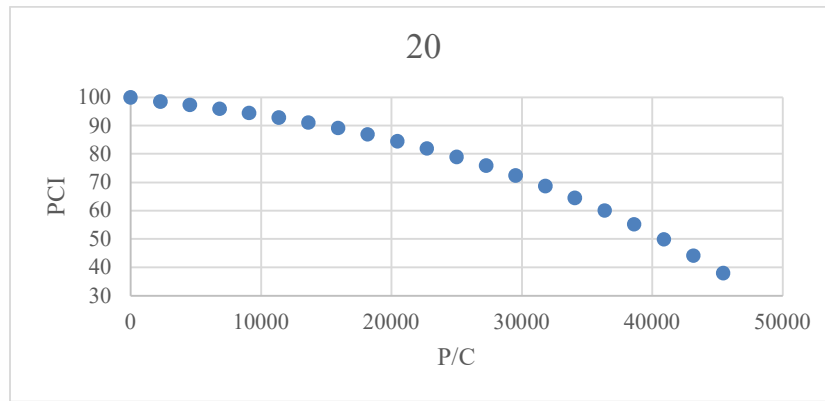


Figura 23. Curva PCI vs Pasadas acumuladas de FLG sección 20.

Anexo 5: Gráficos de curvas por pista

Augusta Rgnl at Bush Field (AGS):

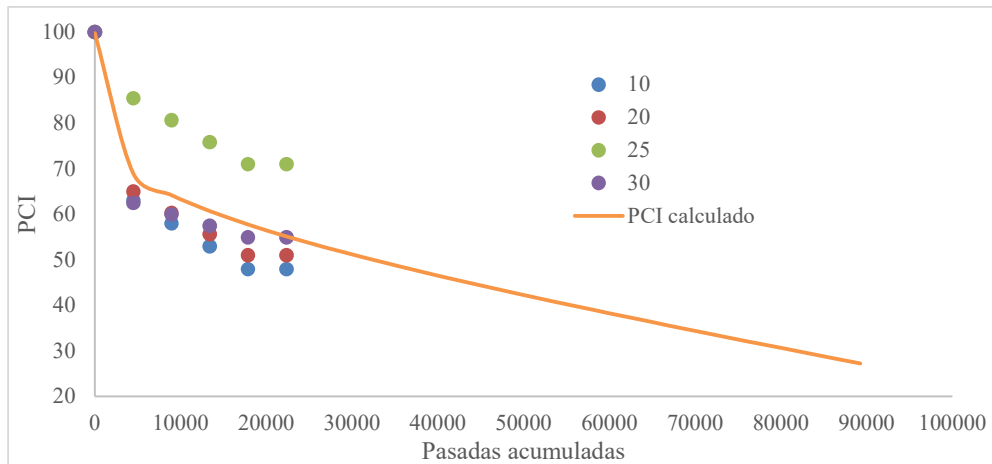
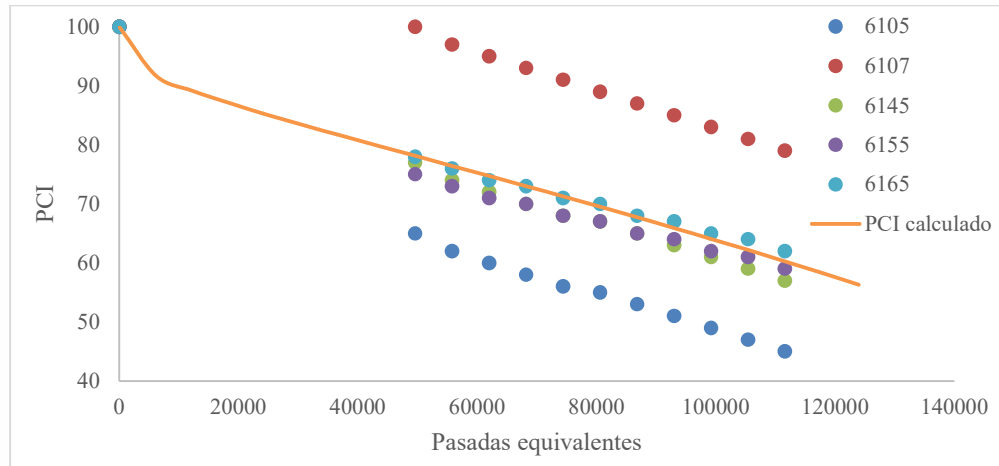


Figura 24. Curva PCI vs Pasadas acumuladas de AGS con su curva proyectada.



Orlando Sanford INTL (SFB):



**Figura 25. Curva PCI vs Pasadas acumuladas de SFB con su curva proyectada.**