



UNIVERSIDAD TECNICA
FEDERICO SANTA MARIA

Departamento de Obras Civiles

DESARROLLO DE MODELOS DEL DESEMPEÑO DE PAVIMENTOS AEROPORTUARIOS DE LA RED PRIMARIA DE CHILE, UTILIZANDO LA BASE DE DATOS HISTÓRICA DEL PCI

Memoria de Título presentada por

NICOLÁS FERNANDO CÓRDOVA GARRIDO

como requisito parcial para optar al título de la carrera de

Ingeniería Civil

Profesores Guía
Gabriel García Saá
Alelí Osorio Lird

Agosto de 2025



CONSTANCIA DE VALIDACIÓN Y CONFIDENCIALIDAD DE MONOGRAFÍA A REPOSITORIO ACADÉMICO

1.- IDENTIFICACIÓN DEL TRABAJO ACADÉMICO

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

Título del trabajo: DESARROLLO DE MODELOS DEL DESEMPEÑO DE PAVIMENTOS AEROPORTUARIOS DE LA RED PRIMARIA DE CHILE, UTILIZANDO LA BASE DE DATOS HISTÓRICA DEL PCI

Nombre del candidato(a): Nicolás Fernando Córdova Garrido

Carrera / Grado: Ingeniería Civil

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

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, Gabriel García Saá / Alelí Osorio Lird, en mi calidad de profesor(a) guía/director(a) del trabajo académico mencionado anteriormente **DEJO CONSTANCIA** que:

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

3.- EVALUACIÓN DE CONFIDENCIALIDAD POR PROPIEDAD INDUSTRIAL

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

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

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

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

4.- FIRMAS

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

Fecha: 04/09/2025

; Firma:

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: 04/09/2025

; Firma:

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

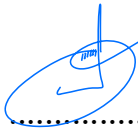
TITULO DE LA TESIS:

**DESARROLLO DE MODELOS DEL DESEMPEÑO DE PAVIMENTOS
AEROPORTUARIOS DE LA RED PRIMARIA DE CHILE, UTILIZANDO
LA BASE DE DATOS HISTÓRICA DEL PCI**

AUTOR:

NICOLÁS FERNANDO CÓRDOVA GARRIDO

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 Saá	
Miembro 1 Comisión		
Miembro 2 Comisión		

Santiago, Chile, agosto de 2025

Índice

1.	introducción.....	6
1.1	Generalidades.....	6
1.2	Definición del Problema	6
1.3	Objetivos	7
1.3.1	Objetivo General.....	7
1.3.2	Objetivos Específicos	7
1.4	Metodología	7
1.4.1	Objetivo Especifico 1:	7
1.4.2	Objetivo Especifico 2:	7
1.4.3	Organización del trabajo.....	8
2.	Marco Teórico	9
2.1	Evidencia y Justificación	9
2.2	Red Aeroportuaria nacional	9
2.3	Sistema de gestión de pavimentos aeroportuarios	11
2.4	Índice de condición del pavimento PCI	12
2.4.1	Definición del PCI.....	12
2.4.2	Metodología de evaluación del PCI.....	12
2.4.3	Tipología de deterioros considerados en el PCI	12
2.5	Modelos de predicción del pavimento	14
3.	Datos.....	15
3.1	Base de Datos.....	15
3.1.1	Variable climática.....	16
3.1.2	Tráfico aéreo.....	16
3.1.3	Estructura del pavimento	18
3.1.4	Índice de condición del pavimento.....	19
3.2	Análisis Base de Datos.....	20
4.	Metodología de Modelación con cadenas de Markov	22

5.	Modelos Realizados	23
5.1	Aeródromo La Florida	23
5.2	Aeropuerto El Tepual.....	26
5.3	Aeropuerto Andrés Sabella	30
5.4	Aeródromo Balmaceda	32
6.	Conclusiones y Recomendaciones	34
7.	Referencias.....	36
A.	Anexo 1	38
B.	Anexo 2	42
C.	Anexo 3	49
D.	Anexo 4	53

“DESARROLLO DE MODELOS DEL DESEMPEÑO DE PAVIMENTOS AEROPORTUARIOS DE LA RED PRIMARIA DE CHILE, UTILIZANDO LA BASE DE DATOS HISTÓRICA DEL PCI”

Nicolás Córdova Garrido¹, Alelí Osorio², Gabriel García³

¹ Universidad Técnica Federico Santa María

Resumen

La presente memoria tiene como objetivo desarrollar modelos de comportamiento del pavimento para aeropuertos de la red primaria de Chile, mediante la utilización de datos históricos del Índice de Condición del Pavimento (PCI) y la aplicación de cadenas de Markov como herramienta de modelación. El trabajo se enmarca en el contexto del desarrollo de un futuro Sistema de Gestión de Pavimentos Aeroportuarios (SGPA), con miras a optimizar la planificación de mantenimiento y la asignación de recursos en infraestructura aeroportuaria.

Uno de los principales hallazgos del estudio radica en las severas limitaciones que presenta la base de datos disponible: gran parte de los registros de PCI carece de continuidad temporal, no se encuentra acompañada de antecedentes de mantenimiento, o contiene errores atribuibles a inconsistencias metodológicas. Como resultado, solo cuatro aeropuertos cumplieron con los requisitos mínimos para ser modelados: La Florida, El Tepual, Andrés Sabella y Balmaceda.

Los modelos generados mostraron niveles de ajuste variables. Mientras La Florida y El Tepual obtuvieron métricas satisfactorias, con coeficientes de determinación (R^2) superiores a 0,6 y errores promedio moderados, los modelos de Andrés Sabella y Balmaceda presentaron bajo poder explicativo debido a la escasa calidad de los datos. Estos resultados refuerzan la necesidad de mejorar los sistemas de recolección, validación y trazabilidad de información técnica para avanzar en una gestión predictiva eficiente.

Palabras clave: PCI, pavimentos aeroportuarios, cadenas de Markov.

1. introducción

1.1 Generalidades

La red primaria de aeropuertos de Chile representa una infraestructura estratégica para la conectividad territorial, permitiendo el transporte de personas, bienes y servicios a lo largo del país. Esta red, compuesta por 17 aeropuertos y aeródromos distribuidos desde Arica hasta Punta Arenas, cumple un rol esencial en un territorio caracterizado por su extensa longitud y diversidad geográfica, siendo una herramienta clave para el desarrollo económico, el turismo, la integración regional y la atención de emergencias (MOP, 2025). En este contexto, garantizar el funcionamiento continuo y seguro de los aeropuertos es una prioridad nacional.

Dentro de los componentes críticos de esta infraestructura, los pavimentos aeroportuarios destacan por su importancia en la operatividad de las aeronaves, ya que sobre ellos se desarrollan las maniobras de despegue, rodaje y aterrizaje. Estos pavimentos están sometidos a condiciones exigentes, incluyendo el tránsito de aeronaves de gran peso, ciclos térmicos extremos, exposición a humedad, acumulación de contaminantes y otras sollicitaciones estructurales que aceleran su deterioro. A diferencia de los pavimentos viales tradicionales, los aeroportuarios deben cumplir con estándares más estrictos en cuanto a seguridad, fricción superficial y capacidad estructural (M. Y. Shahin, 2005).

El objetivo de esta memoria es desarrollar modelos del comportamiento de los pavimentos aeroportuarios en la red primaria de Chile, utilizando la base de datos histórica del Índice de Condición del Pavimento. El estudio del deterioro de los pavimentos y el desarrollo de modelos que permitan predecir su comportamiento en el tiempo ha sido abordado por diversos enfoques a nivel internacional, destacando entre ellos el uso de modelos probabilísticos como las cadenas de Markov. Este enfoque resulta particularmente relevante en el contexto chileno, donde los registros históricos pueden ser fragmentados o con baja frecuencia temporal (Alharbi et al., 2018; Roh et al., 2023).

La presente memoria se inscribe dentro del proyecto FONDEF ID23I10113, cuyo objetivo es desarrollar un Sistema de Gestión de Pavimentos Aeroportuarios (SGPA) que permita optimizar la planificación del mantenimiento en la red primaria de aeropuertos de Chile. En específico, se busca generar modelos del desempeño de los pavimentos aeroportuarios utilizando la base de datos histórica del Índice de Condición del Pavimento (PCI), integrando además variables estructurales, climáticas y de tráfico aéreo. Esta aproximación tiene como propósito mejorar la eficiencia en la asignación de recursos, prolongar la vida útil de las superficies pavimentadas y garantizar la seguridad operativa de las infraestructuras aeroportuarias en el largo plazo.

1.2 Definición del Problema

Un Sistema de Gestión del Pavimento (SGP) se define por la American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) como “un conjunto de herramientas o métodos que ayudan a los tomadores de decisiones a encontrar estrategias óptimas para proporcionar, evaluar y mantener pavimentos en condiciones de servicio durante un período de tiempo” (AASHTO, 1993). El Sistema de Mantenimiento de Pavimentos es una herramienta fundamental en la gestión de activos viales, que ayuda a los tomadores de decisiones a encontrar estrategias óptimas para proporcionar, evaluar y mantener los pavimentos en condiciones de servicio durante un período de tiempo. Incluye actividades como planificación de inversiones, diseño, construcción, mantenimiento y evaluación rutinaria de pavimentos. El SGP permite mejorar la eficiencia del proceso de gestión al revisar los efectos de las acciones adoptadas tomadas en diferentes niveles de gestión, optimizando la asignación presupuestaria, priorizando proyectos de manera basada en datos y utilizando estrategias de mantenimiento efectivas. Proporciona a las agencias viales capacidades para evaluar las condiciones actuales y futuras de los pavimentos, lo que resulta en una gestión más efectiva de los activos viales.

Analógicamente al caso vial, la conservación y planificación del mantenimiento de los pavimentos aeroportuarios requiere de herramientas que permitan anticipar su evolución y deterioro de forma confiable. Para esto, resulta esencial contar con modelos de desempeño que representen adecuadamente el comportamiento de estas infraestructuras frente a distintos factores de exposición, como el tráfico

aéreo, la estructura del pavimento y el entorno climático. Sin embargo, en el contexto chileno, no se dispone aún de modelos específicos que reflejen la realidad operativa y ambiental de la red primaria de aeropuertos, lo que genera una brecha importante en la gestión técnica y financiera de estas obras.

En la literatura internacional, Países como Corea (Park et al., 2023; Roh et al., 2023), Palestina (Issa & Abu Eisheh, 2019), Perú (Camarena, 2018), Canadá (Ansarilari & Golroo, 2020), entre otros (Noruzoliaee & Zou, 2019), han desarrollado modelos avanzados que permiten predecir el comportamiento del pavimento y optimizar las intervenciones de mantenimiento. Sin embargo, estos modelos, si bien avanzados, no son fácilmente transferibles a otros contextos debido a las diferencias en condiciones climáticas, tipos de tráfico y características del pavimento (Alharbi et al., 2018). A nivel general, la mayoría de estos modelos de deterioro utilizan técnicas probabilísticas, entre las cuales las cadenas de Markov son de las más empleadas, debido a que permiten trabajar con bases de datos limitadas y estimar las probabilidades de transición entre estados de condición del pavimento considerando la experiencia y el conocimiento disponible (Roh et al., 2023).

Asimismo, según información recopilada en la Dirección de Aeropuertos del Ministerio de Obras Públicas (Ortiz, M., Ingeniero de Proyectos de Infraestructura Aeroportuaria en Dirección de Aeropuertos, Ministerio de Obras Públicas, comunicación personal, 08 de abril de 2024), la red primaria chilena se caracteriza por una alta heterogeneidad en cuanto a la estructura de capas, lo que complejiza aún más la aplicación directa de modelos foráneos. Esta diversidad estructural y climática, evidenciada también por el análisis comparativo de tráfico aéreo y condiciones ambientales en los distintos aeropuertos nacionales (Camarena, 2018), subraya la necesidad de desarrollar modelos propios, adaptados a la realidad chilena.

Por tanto, el problema abordado en esta memoria se centra en la inexistencia de un modelo de deterioro calibrado a las condiciones específicas de los aeropuertos de la red primaria de Chile. Esta ausencia no solo limita la capacidad de anticipación en la gestión del mantenimiento, sino que también impide una planificación estratégica basada en datos locales y ajustada a las condiciones reales de servicio. La falta de esta herramienta pone en riesgo la eficiencia de las inversiones, la seguridad operacional de las pistas y la sostenibilidad de la infraestructura a largo plazo.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

- Desarrollar modelos del desempeño de pavimentos aeroportuarios de la red primaria de Chile, utilizando la base de datos histórica del PCI.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Analizar los datos históricos del índice de condición de pavimentos (PCI) y los datos de la estructura de pavimentos aeroportuarios de la red primaria de Chile para reducir dimensiones, optimizar el proceso de modelación y seleccionar las variables de modelación.
- Desarrollar y validar modelos de deterioro de pavimentos que incorporen datos locales de la red primaria de aeropuertos de Chile.

1.4 Metodología

1.4.1 Objetivo Especifico 1:

- Recolección de datos climáticos de los diferentes aeropuertos de la red primaria de Chile.
- Recolección de datos de tráfico aéreo de los diferentes aeropuertos de la red primaria de Chile.
- Evaluación de la estructura del pavimento de la red primaria.
- Análisis de la condición del pavimento utilizando el índice PCI.

1.4.2 Objetivo Especifico 2:

- Revisión bibliográfica de estudios sobre el desarrollo de modelos para las diferentes secciones de la red aeroportuaria.
- Definición de la metodología para modelar.

- Integración de datos locales con la metodología seleccionada.
- Desarrollo de modelos de comportamiento del pavimento utilizando PCI.
- Validación del modelo.

1.4.3 Organización del trabajo

El desarrollo de esta memoria se estructuró en distintas etapas que permitieron avanzar de manera progresiva en el cumplimiento de los objetivos, garantizando que los modelos de desempeño de los pavimentos aeroportuarios fueran construidos con rigurosidad y debidamente validados. A continuación, se describe el proceso metodológico seguido, conservando un enfoque claro y coherente con la naturaleza técnica del estudio.

En una primera instancia, se llevó a cabo la recopilación y organización de la información disponible sobre los aeropuertos pertenecientes a la red primaria de Chile. Con este propósito, se construyó una base de datos integral que incorporó antecedentes históricos del Índice de Condición del Pavimento (PCI), configuraciones estructurales de los pavimentos, datos sobre el volumen de tráfico aéreo y registros climáticos específicos para cada aeropuerto.

Posteriormente, se procedió a una revisión exhaustiva de la base de datos elaborada, con el objetivo de asegurar la consistencia y calidad de los datos recopilados. En esta etapa, se identificaron posibles errores o incongruencias y se depuraron aquellos registros que no cumplían con los criterios mínimos requeridos para la modelación. Se estableció, por ejemplo, que era indispensable contar con al menos dos mediciones del PCI por unidad muestral para evaluar adecuadamente la evolución del pavimento en el tiempo. Asimismo, se clasificaron los pavimentos según su materialidad y su localización funcional dentro del recinto aeroportuario.

Al inicio de este trabajo se dejó abierta la posibilidad de emplear distintas metodologías de modelación del deterioro, incluyendo enfoques determinísticos, probabilísticos o basados en inteligencia artificial. Sin embargo, tras el análisis de la base de datos disponible, se constató que los registros del PCI presentaban limitaciones importantes en cuanto a continuidad temporal y trazabilidad de las intervenciones de mantenimiento. Bajo estas condiciones, los modelos determinísticos o mecanicistas requerirían un volumen de información más completo y detallado del que actualmente se dispone, resultando poco aplicables. En cambio, los modelos probabilísticos, y en particular las cadenas de Markov, han demostrado ser especialmente adecuados para trabajar con datos incompletos o de baja resolución temporal, permitiendo estimar la evolución del pavimento a partir de la condición observada y las probabilidades de transición entre estados. Por esta razón, se concluyó que la metodología más consistente y viable para los datos de la red primaria chilena correspondía al uso de cadenas de Markov, sobre la cual se estructura el resto del estudio.

En una tercera etapa, se construyeron las matrices de transición necesarias para la aplicación del modelo de cadenas de Markov. Para ello, se definieron intervalos discretos del PCI que representaran diferentes estados de condición del pavimento, y se cuantificaron las transiciones observadas entre estos estados en años consecutivos. Dichas matrices permitieron calcular la probabilidad de que un pavimento pase, por ejemplo, de un estado “bueno” a “regular” entre una inspección y otra. Asumiendo que estas probabilidades se mantienen constantes en el tiempo, se aplicó el modelo de Markov homogéneo para proyectar la evolución futura del PCI en cada aeropuerto analizado.

Con el fin de verificar la validez del modelo, se compararon las predicciones generadas con datos reales que no fueron utilizados durante la calibración. Esta comparación se realizó utilizando métricas estadísticas como el Error Cuadrático Medio (RMSE), el Error Absoluto Medio (MAE), el coeficiente de determinación (R^2) y el criterio de información de Akaike (AIC). Además, se generaron gráficos que facilitaron la visualización del comportamiento proyectado del pavimento en distintos escenarios, evaluando así la precisión y robustez del modelo.

Finalmente, se presentaron las conclusiones derivadas del estudio y se propusieron recomendaciones orientadas a mejorar y extender la aplicabilidad del modelo en futuros desarrollos. Se plantearon, además, sugerencias para la implementación de estos modelos en un Sistema de Gestión de Pavimentos Aeroportuarios (SGPA) a nivel nacional, facilitando la planificación estratégica de mantenimiento y

conservación de la infraestructura. A lo largo de todo el trabajo, cada etapa fue diseñada para nutrirse de la anterior, conformando una metodología clara, coherente y replicable, que permite abordar de manera integral el análisis del desempeño de pavimentos aeroportuarios bajo condiciones locales específicas.

2. Marco Teórico

2.1 Evidencia y Justificación

“El desarrollo del modelo de desempeño del pavimento es un paso importante en la predicción de la condición futura de la sección del pavimento y, en consecuencia, identificar el camino correcto para la rehabilitación y mantenimiento en el momento adecuado para el tramo adecuado.” (Issa & Abu Eishah, 2019). Este permite planificar financieramente, elaborar presupuestos, diseñar pavimentos y realizar análisis económicos del ciclo de vida. “Uno de los componentes más importantes de los sistemas de gestión de pavimentos es la predicción del deterioro de la red mediante modelos de rendimiento” (Hosseini & Smadi, 2021). Los modelos predicen cuándo se necesitará mantenimiento, ayudan a priorizar los requisitos de mantenimiento, estiman las necesidades de financiamiento a largo plazo y evalúan las consecuencias de diferentes presupuestos. Además, estos modelos relacionan las variables de exposición del pavimento con su deterioro, lo que los hace útiles tanto para el diseño como para la evaluación económica del ciclo de vida.

Desarrollar un modelo específico para el deterioro del pavimento en los aeropuertos chilenos es fundamental debido a que los modelos ya existentes, no logran adaptarse de la mejor forma posible a las condiciones actuales que presenta la red primaria del país, además, podemos observar que la entidad encargada de hacer estas reparaciones aun no posee directamente un modelo de deterioro, “es una herramienta no desarrollada en la actualidad por la DAP (Dirección de Aeropuertos de Chile) y su desarrollo ayudara a la toma de decisiones de gestores de infraestructura, encargados de la conservación y mantenimiento de los pavimentos de aeropuertos del país” (Montecinos, 2021). La falta de un modelo adaptado a estas características del país podría resultar en una asignación ineficiente de recursos para el mantenimiento del pavimento, aumentando el riesgo de deterioro acelerado y, potencialmente, de incidentes en las infraestructuras aeroportuarias. Por lo tanto, es esencial crear modelos que integren estos factores específicos, permitiendo una gestión más eficiente y segura de los pavimentos en los aeropuertos de Chile. Este enfoque garantizará que las decisiones de mantenimiento se basen en datos precisos y relevantes, optimizando así el uso de recursos y mejorando la seguridad operativa.

2.2 Red Aeroportuaria nacional

En Chile existe una extensa red aeroportuaria compuesta por 319 Aeródromos, 124 Helipuertos y 7 Aeropuertos distribuidos desde Arica a la Antártica, incluyendo los territorios insulares. La Dirección General de Aeronáutica Civil, administra directamente 102 de ellos (propiedad fiscal) y en 42 hay personal DGAC, quienes brindan servicios aeroportuarios y de navegación aérea, además de ejercer labores de fiscalización y control, las que realiza también en la totalidad de la Red Aeroportuaria Nacional (DGAC, 2025).

Dentro de la totalidad de la red aeroportuaria nacional, esta se divide en red primaria, red secundaria, red de pequeños aeródromos y red de aeródromos militares, entre los cuales:

- 17 pertenecen a la red primaria.
- 12 pertenecen a la red secundaria.
- 279 pertenecen a la red de pequeños aeródromos.
- 11 pertenecen a la red de aeródromos militares.

La dirección que está a cargo del desarrollo y mantenimiento de la infraestructura aeroportuaria del país corresponde a la Dirección de Aeropuertos (DAP), el cual es un servicio dependiente del Ministerio de Obras Públicas (DAP, 2024).

En cambio, la dirección general de aeronáutica civil (DGAC), tiene como función normar y fiscalizar las actividades aéreas que se realizan en el espacio aéreo controlado por Chile y las que ejecutan usuarios nacionales en el extranjero; prestar servicios de navegación aérea, meteorología, aeroportuarios y seguridad operacional, con el propósito de permitir una actividad aérea segura, eficiente y sustentable, contribuyendo al desarrollo nacional (Chile Atiende GOB, 2024).

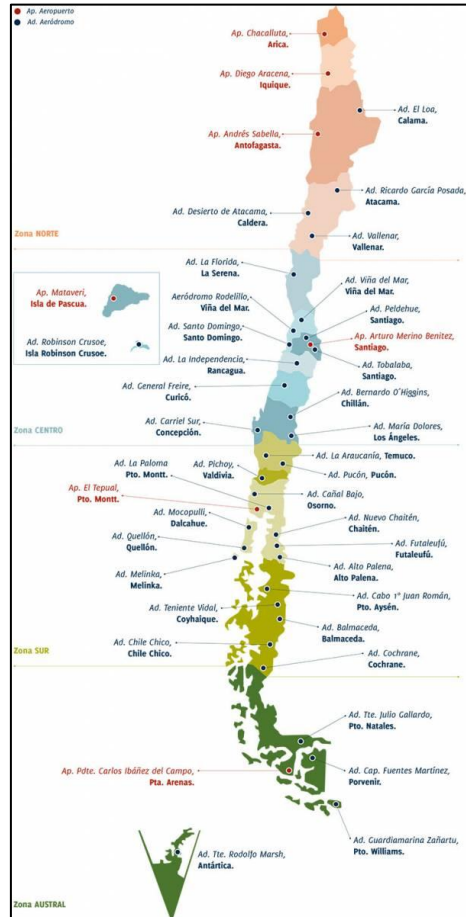


Figura 1. Zona geográfica aeropuertos y aeródromos de Chile.

Fuente: (DGAC, 2025).

Por otro lado, con mayor énfasis en la red primaria de Chile, esta red está conformada por 17 recintos aeroportuarios (7 aeropuertos y 10 aeródromos), ubicados en 13 regiones, que son utilizados de manera frecuente por las grandes aerolíneas para el transporte de pasajeros y carga. Abarcan aproximadamente el 99,5% de los pasajeros oficialmente registrados. En estos lugares la Dirección de Aeropuertos interviene en forma periódica para la realización de obras de conservación, mejoramiento o ampliación de las pistas, plataformas de estacionamiento de aeronaves, calles de rodaje, márgenes de seguridad y cercos perimetrales. También efectúa trabajos de mantenimiento y ampliación de los terminales de pasajeros en los recintos que no están concesionados (MOP, 2025).

Aeropuertos red primaria: Chacalluta (Arica), Diego Aracena (Iquique), Andrés Sabella (Antofagasta), Arturo Merino Benítez (Santiago), El Tepual (Puerto Montt), Presidente Carlos Ibáñez Del Campo (Punta Arenas), Mataveri (Rapa Nui).

Aeródromos red primaria: El Loa (Calama), Desierto De Atacama (Caldera), La Florida (La Serena), Carriel Sur (Concepción), La Araucanía (Freire), Pichoy (Mariquina), Cañal Bajo (Osorno), Mocopulli, Balmaceda, Teniente Julio Gallardo (Puerto Natales).

lugar de aplicar una mayor cantidad de fondos para mejorar un pavimento en condición muy mala o fallida (Federal Aviation Administration FAA, 2022).

2.4 Índice de condición del pavimento PCI

2.4.1 Definición del PCI

El PCI es un indicador clave utilizado en la evaluación de la salud y el desempeño de los pavimentos. Este indicador puede incluir índices de grietas, índices de rugosidad, índices de deformación, índices de desprendimientos, entre otros. Proporciona una forma estandarizada de comunicar el estado del pavimento, lo que facilita la toma de decisiones en cuanto a mantenimiento, rehabilitación y asignación de recursos. La calificación de la condición del pavimento es fundamental para la planificación estratégica a corto y largo plazo, permitiendo a las agencias viales priorizar intervenciones y optimizar la gestión de activos viales. A nivel general este es medido utilizando el índice PCI, el cual es un valor único que representa el estado del pavimento, estos se encuentran en una escala numérica que puede ser utilizada como una herramienta de comunicación para proporcionar una breve información sobre el estado del pavimento a los administradores de alto nivel, funcionarios electos, y el público (Haas et al., 1994). Este índice PCI es un parámetro objetivo, el cual es calculado mediante la disminución de un valor, según la gravedad y número de deterioros visualizados en el pavimento, los cuales dependerán del tipo de pavimento el cual se esté calificando, ya sea de asfalto u hormigón. (ASTM, 1998).

“El PCI es un indicador numérico que califica el estado de la superficie del pavimento. El PCI proporciona una medida de la condición actual del pavimento basada en el mal estado observado en la superficie del pavimento, que también indica la integridad estructural y la condición operativa de la superficie (rugosidad localizada y seguridad). El PCI no puede medir la capacidad estructural, ni proporciona una medición directa de la resistencia al deslizamiento o la rugosidad. Proporciona una base objetiva y racional para determinar las necesidades de mantenimiento y reparación y las prioridades. La monitorización continua del PCI se utiliza para establecer la tasa de deterioro del pavimento, lo que permite la identificación temprana de las principales necesidades de rehabilitación. El PCI proporciona información sobre el rendimiento del pavimento para la validación o mejora de los procedimientos actuales de diseño y mantenimiento del pavimento” (ASTM D5340-24, 2024).

2.4.2 Metodología de evaluación del PCI

La metodología para determinar el PCI implica una inspección visual detallada del pavimento, durante la cual se identifican los tipos de deterioro presentes, su severidad y su extensión. Estos deterioros se clasifican según estándares establecidos y se utilizan para calcular un valor de deducción que se resta de 100 para obtener el PCI final. Este proceso está estandarizado en las normas ASTM D6433 para carreteras y estacionamientos, y ASTM D5340 para pavimentos aeroportuarios.

2.4.3 Tipología de deterioros considerados en el PCI

La norma ASTM D5340, que se utiliza para calcular el PCI en pavimentos aeroportuarios, define distintos tipos de deterioro, los cuales son identificados según el pavimento sea de asfalto u hormigón. A continuación, se presentan unas tablas resumen con los respectivos deterioros y su causa para pavimentos de asfalto u hormigón (M. Y. Shahin, 2005).

Tabla 1. Deterioros típicos de pavimentos de asfalto.

Código	Tipo de falla	Causa
41	Piel de cocodrilo [m2]	Cargas
42	Exudación [m2]	Otros
43	Fisura de bloque [m2]	Clima
44	Corrugamiento [m2]	Otros
45	Depresiones [m2]	Otros

Código	Tipo de falla	Causa
46	Erosión por chorro de jet [m2]	Otros
47	Grietas de reflexión de juntas de pavimentos de hormigón [m]	Clima
48	Grietas longitudinales y transversales. [m]	Clima
49	Derrame de aceites solventes [m2]	Otros
50	Bacheos [m2]	Otros
51	Agregados pulidos [m2]	Otros
52	Erosión superficial [m2]	Clima
53	Ahuellamiento [m2]	Cargas
54	Levantamiento en unión de pavimentos asfálticos por empuje de pavimento de hormigón [m2]	Otros
55	Grietas por resbalamiento [m2]	Otros
56	Hinchamiento [m2]	Otros

Tabla 2. Deterioros típicos de pavimentos de hormigón.

Código	Tipo de falla	Causa
61	Levantamiento de losas por dilatación (blow up) [Losas]	Clima
62	Grietas de esquina [Losas] [m2]	Cargas
63	Grietas longitudinales, transversales y diagonales [Losas]	Cargas
64	Grietas tipo "D" [Losas]	Clima
65	Daño al sello de juntas	Clima
66	Parches menores o iguales que 0.5 m2 [Losas]	Otros
67	Parches mayores a 0.5 m2 [Losas]	Otros
68	Agujeros [Losas]	Otros
69	Bombeo [Losas]	Otros

Código	Tipo de falla	Causa
70	Escamaduras, grietas tipo mapeo y cuarteaduras [Losas]	Otros
71	Escalonamiento [Losas]	Otros
72	Grietas en bloque [Losas]	Cargas
73	Grietas de contracción [Losas]	Otros
74	Astillamiento en juntas [Losas]	Otros
75	Astillamiento de esquina [Losas]	Otros

2.5 Modelos de predicción del pavimento

Modelado del Comportamiento del Pavimento: Un modelo de comportamiento se define como “una descripción matemática de los valores esperados que tomará un atributo del pavimento durante un periodo de análisis especificado” (W. R. HUDSON et al., 1979). El modelado del comportamiento del pavimento es un proceso crucial para predecir la evolución de las condiciones del pavimento a lo largo del tiempo. Se pueden emplear modelos determinísticos, probabilísticos, expertos y de redes neuronales artificiales para estimar la evolución de distreses como grietas, deformaciones, desprendimientos y rugosidad en los pavimentos. Estos modelos permiten a las agencias viales anticipar el deterioro del pavimento, planificar intervenciones de mantenimiento y rehabilitación de manera proactiva, y optimizar la asignación de recursos. El modelado del comportamiento del pavimento es una herramienta poderosa para mejorar la gestión de activos viales y garantizar la seguridad y eficiencia de la red vial.

- **Modelos Determinísticos:** Los modelos determinísticos son utilizados en el modelado del comportamiento del pavimento para predecir un valor dependiente, como el PCI, a partir de una o más variables independientes, como la edad del pavimento, la carga de tráfico, el entorno y parámetros estructurales. Estos modelos, basados principalmente en análisis de regresión, se dividen en tres subcategorías: modelos empíricos, mecanicistas y empírico-mecanicistas (NINGYUAN LI et al., 1996). Los modelos empíricos, ampliamente utilizados en estudios de comportamiento del pavimento, requieren una gran cantidad de datos para su modelado y estiman la respuesta del pavimento a variaciones en las variables de entrada. Aunque son útiles, presentan ventajas y desventajas, como su simplicidad matemática, la capacidad de actualización con resultados futuros y la necesidad de una gran cantidad de datos para su construcción.
- **Modelos Probabilísticos:** Los modelos probabilísticos son una herramienta efectiva para predecir el comportamiento del pavimento, ya que capturan la incertidumbre en el modelo de predicción del comportamiento del pavimento. Esta aproximación es más realista que la determinística, ya que combina observaciones de campo y opiniones de expertos. Los modelos probabilísticos permiten incorporar conocimiento experto en casos donde la base de datos es incompleta, de baja calidad o imprecisa. Al utilizar modelos probabilísticos, se puede mejorar la precisión de las predicciones y tener en cuenta la variabilidad inherente en el comportamiento del pavimento a lo largo del tiempo. Según Golroo y Tighe, los tipos más comunes de modelos probabilísticos son los modelos de Markov, la regresión bayesiana, las curvas de supervivencia y los modelos semi-markov (Golroo & Tighe, 2012).

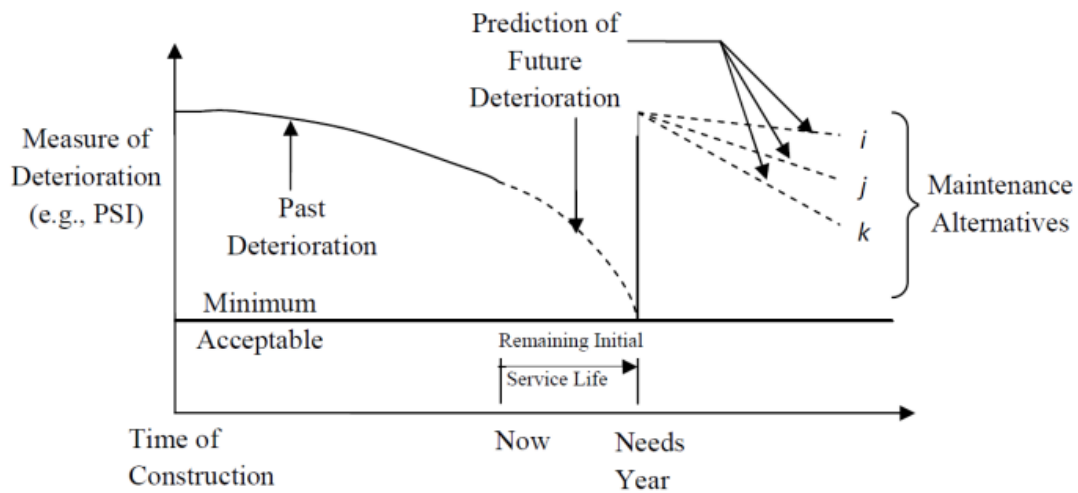


Figura 3. Modelo Probabilístico Cadenas de Márkov.

Fuente: (Alharbi et al., 2018).

- **Modelos hechos por Expertos:** Los modelos hechos por expertos se basan en la experiencia y conocimiento colectivo de ingenieros de agencias viales familiarizados con los patrones de deterioro del pavimento. Estos modelos pueden ser utilizados cuando no hay datos históricos disponibles, existen datos faltantes o se está desarrollando un nuevo diseño. Algunas prácticas estatales incluyen el desarrollo de curvas de desempeño basadas en paneles de expertos, la utilización del conocimiento experto en la predicción de índices de grietas, desprendimientos, rugosidad y deformaciones, entre otros. Los modelos expertos son una herramienta valiosa en situaciones donde la información histórica es limitada o no está disponible, permitiendo realizar predicciones fundamentadas en el conocimiento especializado de los profesionales.
- **Modelos de Redes Neuronales Artificiales (ANN):** “Redes neuronales artificiales son redes interconectadas masivamente en paralelo de elementos simples (usualmente adaptativos) y con organización jerárquica, las cuales intentan interactuar con los objetos del mundo real del mismo modo que lo hace el sistema nervioso biológico” (Matich, 2001). Los modelos de Redes Neuronales Artificiales son una técnica avanzada utilizada en el modelado del desempeño del pavimento. A diferencia de otros modelos, las ANN pueden manejar un gran número de variables de entrada, abordar la falta de disponibilidad de algunas variables y capturar correlaciones entre las variables. A través de la capacitación de la red neuronal con datos históricos, las ANN pueden predecir con precisión el desempeño futuro del pavimento en términos de grietas, rugosidad, deformaciones y otros indicadores. Su capacidad para aprender patrones complejos y adaptarse a diferentes escenarios los convierte en una herramienta poderosa para la predicción del desempeño del pavimento.

3. Datos

3.1 Base de Datos

Dentro de la modelación del comportamiento de los pavimentos, es necesario tener una serie de variables o “base datos” a la cual acudir cuando estas sean necesarias. “La base de datos de un sistema de gestión de pavimentos aeroportuarios se considera un elemento fundamental para el correcto funcionamiento del sistema” (Tolmo, 2020). Dentro de las cuales destacan, la estructura e inventario del pavimento, el historial de mantenciones y rehabilitaciones, datos de la condición del pavimento (PCI), y las solicitudes a las cuales va a estar sometido el pavimento, tales como cargas del tráfico o variables climáticas (Alvarez, 2020).

La recopilación sistemática de variables como el clima, el tráfico aéreo y las características estructurales de los pavimentos es esencial para la segmentación efectiva de los aeropuertos y aeródromos de la red primaria. Esta segmentación permite identificar agrupaciones con condiciones similares, facilitando análisis conjuntos y estrategias de mantenimiento más eficientes. Cuando las condiciones varían significativamente entre instalaciones, se requiere un análisis individualizado para cada una.

3.1.1 Variable climática

La influencia de las condiciones climáticas en el rendimiento del pavimento es significativa. Factores como la temperatura, la humedad y la precipitación pueden afectar la durabilidad y estabilidad del pavimento. Incorporar datos climáticos en los modelos de rendimiento permite evaluar cómo las condiciones meteorológicas impactan en la degradación del pavimento a lo largo del tiempo y planificar intervenciones de mantenimiento y rehabilitación de manera proactiva.

Como resultado de varias investigaciones “se estableció que la Red Primaria se divide en siete zonas climáticas, garantizando una clasificación más completa y coherente con las condiciones operativas y climáticas de cada aeropuerto” (Nazer, 2024).

Tabla 3. Clasificación Final en 7 zonas. (Nazer, 2024)

Zona 1	Zona 2	Zona 3	Zona 4	Zona 5	Zona 6	Zona 7
Chacalluta Diego Aracena Andrés Sabella Desierto de Atacama La Florida	El Loa	Mataveri	Arturo Merino Benitez	Carriel Sur La Araucanía Pichoy Cañal Bajo	El Tepual Mocopulli	Balmaceda Presidente Carlos Ibañez del Campo

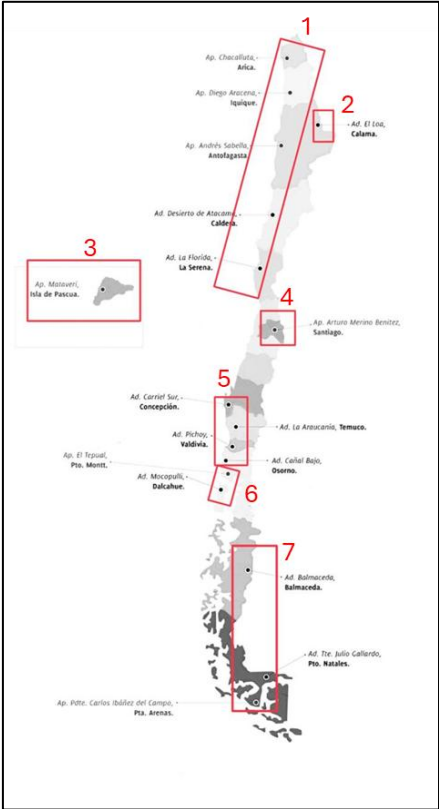


Figura 4. Esquema de la clasificación climática.

Fuente: (Nazer, 2024)

3.1.2 Tráfico aéreo

Las cargas del tráfico ejercen una influencia directa en el desgaste y deterioro del pavimento. Factores como el volumen de tráfico, la composición de este y la distribución de cargas afectan la vida útil del

pavimento y su capacidad para mantener condiciones aceptables de servicio. Incorporar datos de cargas del tráfico en los modelos de rendimiento permite evaluar el impacto de la actividad vehicular en la degradación del pavimento y anticipar necesidades de mantenimiento y rehabilitación en función del nivel de carga al que está expuesto.

La recolección de datos de tráfico aéreo se basa en una base de datos de la Dirección General de Aeronáutica Civil, procesada posteriormente por el equipo Fondef para identificar las aeronaves críticas y más utilizadas en la red.

Tabla 4. Tráfico aéreo red primaria parte 1. Rosas (en desarrollo)

	Aeropuerto/Aeródromo	Sigla	A321	A320	B789	B788	B462	B763	B738	B748	B744	B735
1	Chacalluta	SCAR	4240	14305	0	0	1	0	0	0	0	39
2	Diego Aracena	SCDA	11086	37713	1	0	295	988	1	0	128	277
3	El Ilo	SCCF	14680	35287	0	0	24	0	6	0	0	27
4	Andrés Sabella	SCFA	10187	56949	26	35	0	0	3	0	1	235
5	Desierto de Atacama	SCAT	3264	11906	0	128	116	0	0	0	0	144
6	La Florida	SCSE	2326	25016	0	0	218	0	1	0	0	58
7	Mataverí	SCIP	0	0	1926	668	0	2718	5	0	7	3
8.1	Arturo Merino Benítez (17R-35L)	SCEL (17R-35L)	48885	166708	8700	9414	455	3	9819	266	2378	662
8.2	Arturo Merino Benítez (17L-35R)	SCEL (17L-35R)	36364	137050	13532	12056	247	29676	19197	1422	3612	1107
9	Carriel Sur	SCIE	7879	28764	3	3	24	74	2	0	0	148
10	La Araucanía	SCQP	4891	10468	0	0	1	93	1	0	0	48
11	Pichoy	SCVD	2	4913	0	0	0	0	0	0	0	26
12	Cañal Bajo	SCJO	0	2282	0	0	0	0	0	0	0	11
13	El Tepual	SCTE	14567	41593	1	3	44	427	1	0	0	190
14	Mocopulli	SCPQ	2	2526	0	0	0	0	0	0	0	3
15	Balmaceda	SCBA	1885	13769	0	0	229	25	0	0	0	26
16	Teniente Julio Gallardo	SCNT	0	763	0	0	69	0	0	0	0	9
17.1	Presidente Carlos Ibañez del Campo (07-25)	SCCI (07-25)	6897	15556	392	602	1234	295	3	0	2	98
17.2	Presidente Carlos Ibañez del Campo (12-30)	SCCI (12-30)	1231	2915	2	7	304	37	1	0	0	4
17.3	Presidente Carlos Ibañez del Campo (01-19)	SCCI (01-19)	1172	2801	2	7	258	37	1	0	0	4

Tabla 5. Tráfico aéreo red primaria parte 2. Rosas (en desarrollo)

	Aeropuerto/Aeródromo	Sigla	B77L	B772	A330	A332	A359	C130	B737	RJ1H	F16	F5
1	Chacalluta	SCAR	0	0	0	1	0	30	8	0	0	0
2	Diego Aracena	SCDA	2	104	0	0	0	768	0	262	18972	1040
3	El Ilo	SCCF	0	0	0	0	0	12	13	0	0	0
4	Andrés Sabella	SCFA	0	1	0	3	1	692	26	1	23510	1848
5	Desierto de Atacama	SCAT	0	0	0	0	0	72	2	9	0	0
6	La Florida	SCSE	0	0	0	0	0	24	9	156	0	0
7	Mataverí	SCIP	0	190	0	3	0	22	11	0	0	0
8.1	Arturo Merino Benítez (17R-35L)	SCEL (17R-35L)	414	4063	607	1587	718	1002	3385	245	175	27
8.2	Arturo Merino Benítez (17L-35R)	SCEL (17L-35R)	1716	4838	1377	974	466	1743	2792	154	1007	169
9	Carriel Sur	SCIE	0	1	2	0	0	301	222	0	2	0
10	La Araucanía	SCQP	0	0	0	0	0	69	2	0	2	0
11	Pichoy	SCVD	0	0	0	0	0	10	1	0	3	0
12	Cañal Bajo	SCJO	0	0	0	0	0	8	1	0	0	0
13	El Tepual	SCTE	0	3	0	0	0	509	99	15	245	70
14	Mocopulli	SCPQ	0	0	0	0	0	0	0	0	5	0
15	Balmaceda	SCBA	0	0	0	0	0	103	2	173	0	2
16	Teniente Julio Gallardo	SCNT	0	0	0	0	0	7	1	26	0	23
17.1	Presidente Carlos Ibañez del Campo (07-25)	SCCI (07-25)	0	2	0	2	0	1448	6	590	23	7002
17.2	Presidente Carlos Ibañez del Campo (12-30)	SCCI (12-30)	0	0	0	0	0	310	1	233	0	1454
17.3	Presidente Carlos Ibañez del Campo (01-19)	SCCI (01-19)	0	0	0	0	0	273	1	202	0	1383

Tabla 6. Tráfico aéreo red primaria parte 3. Rosas (en desarrollo)

	Aeropuerto/Aeródromo	Sigla	C550	D228	B200	GLF4	RJ85	G150	C560	BE20	C525
1	Chacalluta	SCAR	611	12	183	142	4	161	44	549	162
2	Diego Aracena	SCDA	910	17	360	451	883	223	12	1383	683
3	El Loa	SCCF	409	14	145	75	24	131	10	391	68
4	Andrés Sabella	SCFA	664	56	393	256	36	238	13	760	13
5	Desierto de Atacama	SCAT	281	59	206	187	60	157	3	232	160
6	La Florida	SCSE	527	2459	363	72	232	56	15	458	527
7	Mataverí	SCIP	1	0	0	69	0	252	0	0	0
8.1	Arturo Merino Benítez (17R-35L)	SCEL (17R-35L)	1490	1855	3062	925	714	1255	223	2075	1739
8.2	Arturo Merino Benítez (17L-35R)	SCEL (17L-35R)	4706	7691	3019	1227	469	1546	94	3306	1929
9	Carriel Sur	SCIE	551	71	525	229	15	84	4	411	248
10	La Araucanía	SCQP	265	35	563	107	0	54	7	439	150
11	Pichoy	SCVD	221	15	152	41	0	74	6	99	109
12	Cañal Bajo	SCJO	211	12	199	23	0	34	2	177	2139
13	El Tepual	SCTE	1027	37	684	285	0	169	12	625	12740
14	Mocopulli	SCPQ	190	3	64	4	0	27	1	90	381
15	Balmaceda	SCBA	279	8	102	30	48	52	6	100	286
16	Teniente Julio Gallardo	SCNT	38	0	31	20	2	67	32	14	61
17.1	Presidente Carlos Ibáñez del Campo (07-25)	SCCI (07-25)	308	8	103	152	153	136	9	45	202
17.2	Presidente Carlos Ibáñez del Campo (12-30)	SCCI (12-30)	68	2	16	16	9	33	0	15	55
17.3	Presidente Carlos Ibáñez del Campo (01-19)	SCCI (01-19)	65	2	16	15	8	32	0	12	54

3.1.3 Estructura del pavimento

La composición y diseño del pavimento son determinantes en su desempeño a lo largo del tiempo. Variables como el tipo y espesor de las capas, la calidad de los materiales utilizados y la compactación influyen en la resistencia del pavimento a las cargas del tráfico y a los efectos del medio ambiente. Considerar la estructura del pavimento en los modelos de rendimiento permite evaluar su capacidad para soportar cargas y deformaciones, así como identificar áreas susceptibles a deterioros prematuros.

Para analizar la estructura del pavimento, primero se recopilieron informes sobre los espesores y capas que lo componen. En la tabla a continuación se presenta un resumen de los años en los que se dispone de datos estructurales de 16 de los 17 aeropuertos, abarcando el período de 2013 a 2024.

Tabla 7. Años con datos de estructura del pavimento.

Datos Estructura								
Aeropuerto / Aeródromo	2013	2014	2016	2019	2021	2022	2023	2024
1 Chacalluta		X			X			
2 Diego Aracena		X			X			
3 El Loa		X			X			
4 Andrés Sabella					X			
5 Desierto de Atacama		X			X			
6 La Florida		X		X	X			X
7 Mataverí		X		X			X	
8 Arturo Merino Benítez		X						
9 Carriel Sur		X				X		
10 La Araucanía					X			
11 Pichoy	X				X			
12 Cañal Bajo	X				X			
13 El Tepual					X			
14 Mocopulli					X			
15 Balmaceda		X	X		X			
16 Teniente Julio Gallardo								
17 Presidente Carlos Ibáñez del Campo		X			X			

Luego, se ha construido una base de datos que resume los datos estructurales recopilados, la cual contiene información acerca de las capas y sus respectivos espesores en cm. La tabla se debe leer de izquierda a derecha, representando una distribución de las capas desde la superior a la inferior, donde A: Asfalto, H: Hormigón, B: Base y SB: Sub-Base.

Tabla 8. Base de datos estructura del pavimento.

Aeropuerto	Año	Seccion	Tipo	A1	B1	H1	A2	B2	H2	B3	SB	AñoConstruccion
LaFlorida	2014	PI-1	Asfalto	10	>20		10			18-25	14-25	2013
LaFlorida	2014	PI-2	Asfalto	5	>20		10			18-25	14-25	1991
LaFlorida	2014	U12-1	Asfalto	7,5	>20		10			18-25	14-25	1991
LaFlorida	2014	U12-2	Asfalto	10	>20		10			18-25	14-25	2013
LaFlorida	2014	U30-1	Asfalto	5	>20				28		20	1991
LaFlorida	2014	U30-2	Asfalto	10	>20				28		20	2013
LaFlorida	2014	ZPCH-12	Asfalto	5	15							1991
LaFlorida	2014	ZPCH-30	Asfalto	5	15							1991
LaFlorida	2014	RB-1	Asfalto	10	30							1991
LaFlorida	2014	MRB-1	Asfalto	5	15							1991
LaFlorida	2014	RC-1	Asfalto	10	30							1991
LaFlorida	2014	MRC-1	Asfalto	5	15							1991
LaFlorida	2014	PL-1	Asfalto	10	26							1998
LaFlorida	2014	PL-2	Asfalto	10	26						18	1991
LaFlorida	2014	PL-3	Asfalto	10	26						18	1998
LaFlorida	2014	PL-4	Asfalto	10	26						18	1991
LaFlorida	2014	PL-5	Hormigón						28		20	1962
LaFlorida	2014	PL-6	Asfalto	10	26						18	2013
LaFlorida	2014	PL-7	Asfalto	5	20							1998

3.1.4 Índice de condición del pavimento

El PCI es un indicador clave utilizado en la evaluación del estado de los pavimentos. Incorporar el PCI como variable en los modelos de rendimiento permite monitorear la evolución de las condiciones del pavimento a lo largo del tiempo y predecir su deterioro futuro.

En primer lugar, fue necesario recopilar toda la información disponible hasta la fecha. En la tabla siguiente se muestra un resumen de los años en que se dispone de información del PCI del aeropuerto.

Tabla 9. Años con datos de condición del pavimento PCI.

Aeropuerto / Aeródromo	Informes PCI												
	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024
1 Chacalluta			X		X					X			
2 Diego Aracena			X							X			
3 El Loa			X							X			
4 Andrés Sabella	X	X	X	X	X	X	X	X		X			
5 Desierto de Atacama			X				X	X		X			
6 La Florida			X	X	X	X		X	X	X			X
7 Mataverí			X					X				X	
8 Arturo Merino Benítez			X								X		
9 Carriel Sur			X				X				X		
10 La Araucanía										X			
11 Pichoy		X			X					X			
12 Cañal Bajo		X					X			X			
13 El Tepual		X	X	X		X				X			
14 Mocopulli							X	X		X			
15 Balmaceda			X		X					X			
16 Teniente Julio Gallardo													
17 Presidente Carlos Ibáñez del Campo			X			X				X			

Nota: X indica auscultación completa del aeropuerto; X indica auscultación incompleta del aeropuerto.

Con los datos de los respectivos informes de PCI, se realizaron dos bases de datos con estos, una para los datos de PCI por sección del aeropuerto, ya sea, pista, calles de rodaje o plataforma. Es un valor promedio de una sección macro del aeropuerto, y, por otro lado, se realizó una base de datos por unidad muestral de las distintas secciones, los cuales corresponden a medidas de aproximadamente 450m² +/- 180 m² para secciones de asfalto o 20 +/-8 losas para pavimentos de hormigón. Los cuales se ven en las tablas X e Y respectivamente.

Tabla 10. Base de datos PCI por secciones del aeropuerto.

Zona	Aeropuerto	Seccion	Tipo de Pavimento	Area m2	Año Construcción	PCI	SCI	UMT	Año Muestreo
La Florida		PI-1	Asfalto	26.396	2013	100	100	59	2014
La Florida		PI-2	Asfalto	52.791	1991	79	100	118	2014
La Florida		U12-1	Asfalto	4.492	1991	82	100	8	2014
La Florida		U12-2	Asfalto	900	2013	98	100	3	2014
La Florida		U30-1	Asfalto	4.700	1991	87	100	13	2014
La Florida		U30-2	Asfalto	675	2013	96	100	2	2014
La Florida		ZPCH-12	Asfalto	1.950	1991	90	100	4	2014
La Florida		ZPCH-30	Asfalto	1.950	1991	85	100	4	2014
La Florida		RB-1	Asfalto	2.195	1991	62	68	5	2014
La Florida		MRB-1	Asfalto	2.051	1991	56	84	6	2014
La Florida		RC-1	Asfalto	2.363	1991	83	87	5	2014
La Florida		MRC-1	Asfalto	1.960	1991	51	84	5	2014
La Florida		PL-1	Asfalto	7.755	1998	90	94	18	2014
La Florida		PL-2	Asfalto	2.177	1991	49	58	6	2014
La Florida		PL-3	Asfalto	3.233	1998	72	76	8	2014
La Florida		PL-4	Asfalto	2.015	1991	51	54	5	2014
La Florida		PL-5	Asfalto	9.486	1962	84	99	24	2014
La Florida		PL-6	Asfalto	960	2013	95	96	2	2014
La Florida		PL-7	Asfalto	4.355	1998	80	86	11	2014

Tabla 11. Base de datos PCI por unidades muestrales de las secciones.

Zona	Aeropuerto	Seccion	UM	PCI	Año Muestreo
La Florida		PI-1	1	97	2014
La Florida		PI-1	2	100	2014
La Florida		PI-1	3	100	2014
La Florida		PI-1	4	100	2014
La Florida		PI-1	5	100	2014
La Florida		PI-1	6	100	2014
La Florida		PI-1	7	97	2014
La Florida		PI-1	8	100	2014
La Florida		PI-1	9	100	2014
La Florida		PI-1	10	100	2014
La Florida		PI-1	11	100	2014
La Florida		PI-1	12	100	2014
La Florida		PI-1	13	100	2014
La Florida		PI-1	14	100	2014
La Florida		PI-1	15	100	2014
La Florida		PI-1	16	97	2014
La Florida		PI-1	17	100	2014
La Florida		PI-1	18	100	2014
La Florida		PI-1	19	97	2014
La Florida		PI-1	20	100	2014
La Florida		PI-1	21	100	2014
La Florida		PI-1	22	100	2014

3.2 Análisis Base de Datos

A partir de la revisión y procesamiento de la base de datos estructurales correspondiente a los pavimentos de la red primaria de aeropuertos y aeródromos de Chile, fue posible identificar una notable diversidad en las configuraciones constructivas al interior de un mismo recinto aeroportuario. Esto evidencia la existencia de múltiples tipos de estructuras dentro de un mismo aeropuerto, lo que responde a las diferentes funciones operacionales de las áreas pavimentadas (pistas, calles de rodaje, plataformas) y a las intervenciones constructivas ejecutadas en distintos periodos. Con el fin de ordenar esta información y facilitar su análisis, se procedió a clasificar las estructuras en función del tipo de material constituyente de sus capas: asfalto, hormigón o estructuras mixtas. A su vez, se categorizó cada

segmento estructural según su ubicación funcional dentro del aeropuerto: pista de aterrizaje y despegue, calle de rodaje o plataforma de estacionamiento de aeronaves.

Esta clasificación permitió establecer una tipología estructural a nivel de red, concluyéndose que, en los aeropuertos y aeródromos para los cuales se dispone de información suficiente, se identificaron un total de 130 estructuras distintas. Este resultado es relevante, ya que da cuenta de la heterogeneidad que presenta la infraestructura aeroportuaria en Chile, tanto en términos de diseño como de materialidad, y refuerza la necesidad de adaptar los modelos de desempeño a las condiciones específicas de cada caso.

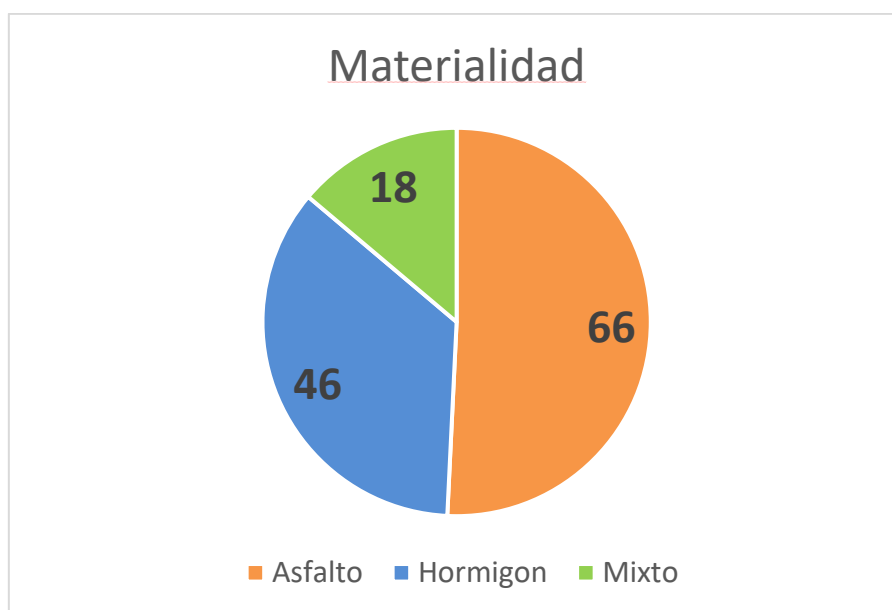


Figura 5. Cantidad de estructuras según materialidad.

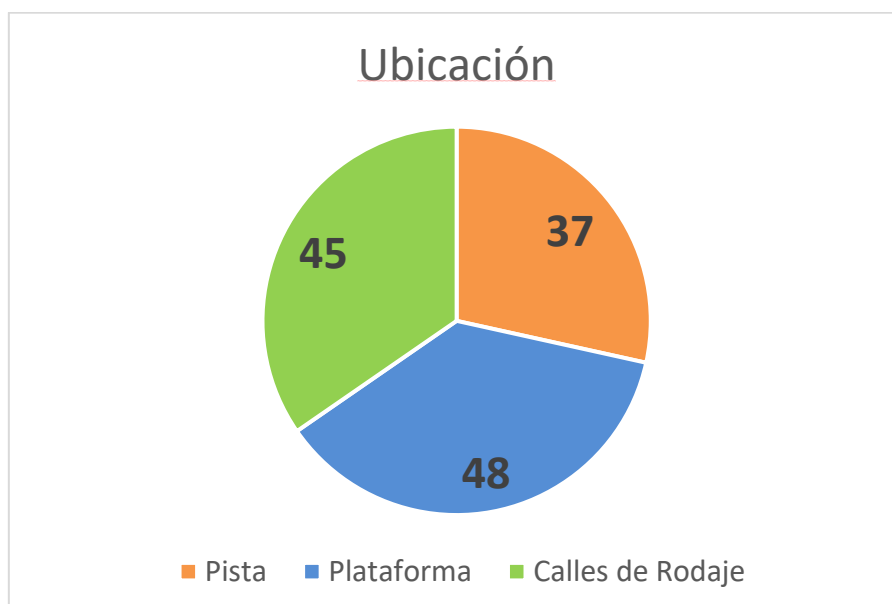


Figura 6. Cantidad de estructuras según ubicación.

En lo que respecta a los datos históricos del Índice de PCI, se detectaron múltiples inconsistencias entre los distintos informes disponibles. En particular, se observaron variaciones del PCI entre años sucesivos que implicaban intervenciones de mantenimiento, sin que existiera un registro detallado de dichas actividades, ni documentación sobre su alcance o tipo. Esta ausencia de trazabilidad técnica impide

establecer con certeza la continuidad temporal del deterioro, lo que afecta directamente la calidad del análisis longitudinal. Debido a esta limitación, y con el objetivo de asegurar la validez de los datos utilizados para modelación, se seleccionaron únicamente aquellos recintos que cuentan con datos continuos, confiables y sin intervenciones intermedias no documentadas.

Como resultado de esta depuración, solo cuatro aeropuertos y aeródromos cumplieron con los criterios de continuidad y consistencia de la información: el Aeródromo La Florida (La Serena), el Aeropuerto El Tepual (Puerto Montt), el Aeropuerto Andrés Sabella (Antofagasta) y el Aeródromo Balmaceda. Estos fueron considerados casos adecuados para llevar a cabo la modelación del deterioro mediante cadenas de Markov, garantizando así una mayor confiabilidad en los resultados obtenidos.

Finalmente, al comparar las características de estos recintos en términos de clima, tráfico aéreo y estructura del pavimento, se evidenció que incluso entre los casos seleccionados existen diferencias significativas. Por ejemplo, aunque el Aeródromo La Florida y el Aeropuerto Andrés Sabella pertenecen a una misma macrozona climática, sus niveles de tráfico aéreo difieren considerablemente, así como también las características de sus estructuras de pavimento. Estas discrepancias refuerzan la necesidad de desarrollar modelos específicos para cada aeropuerto o aeródromo, en lugar de aplicar un enfoque generalizado. La variabilidad observada en las condiciones operacionales y estructurales hace inviable una modelación conjunta, siendo indispensable abordar cada recinto de manera independiente para reflejar con mayor precisión su comportamiento real frente al deterioro.

4. Metodología de Modelación con cadenas de Markov

Con el objetivo de predecir el deterioro de los pavimentos aeroportuarios, se ha optado por utilizar cadenas de Markov como herramienta de modelación probabilística. Este método permite estimar la probabilidad de transición entre distintos estados de condición del pavimento a lo largo del tiempo, considerando únicamente la condición actual del mismo, bajo el supuesto de que las transiciones futuras dependen únicamente del estado presente y no del historial completo del deterioro.

El proceso de modelación comienza con la recopilación y organización de los datos históricos del Índice de PCI a nivel de unidad muestral. Para asegurar la validez del análisis, es fundamental que estos datos mantengan continuidad entre las auscultaciones realizadas en distintos años. Esto implica que no deben haberse producido cambios relevantes en la definición de las secciones, en la ubicación o en la estructura del pavimento, ya que cualquier modificación comprometería la comparabilidad de las observaciones a lo largo del tiempo.

Una vez estructurada la base de datos, se procede a una depuración técnica de los registros. Bajo el supuesto de que no se realizaron actividades de mantenimiento entre las auscultaciones, se eliminan aquellas observaciones en las que se observa un incremento del valor del PCI en la misma unidad muestral de un año a otro. Esto, debido a que un aumento del PCI sin registro de intervención sugiere inconsistencias o errores en los datos, lo cual podría distorsionar el cálculo de las probabilidades de transición.

Con la base de datos filtrada, se evalúa el rango de valores del PCI para establecer los estados discretos necesarios para la construcción de la matriz de transición. En este caso, se opta por dividir el rango total en 10 estados, generando así una matriz de transición de probabilidad de tamaño 10x10. Los intervalos se construyen de forma equidistante, de modo que cubran la totalidad del rango observado de valores PCI. Esta matriz reflejará la frecuencia con la que una unidad de pavimento cambia de un estado de condición a otro entre un año y el siguiente, permitiendo estimar las probabilidades de transición entre cada par de estados.

Además, se define una matriz de estado inicial que representa la condición de la red en el tiempo cero. En este estudio, se asume que toda la red comienza en su estado óptimo, es decir, con un PCI dentro del rango más alto, lo que se representa mediante un vector de estado inicial con valor 1 en la primera posición y 0 en las restantes. Esto se realiza para simplificar el análisis y estandarizar el punto de partida de todas las simulaciones.

Por otra parte, se construye la matriz “S” que representa el valor promedio de PCI asociado a cada uno de los 10 rangos definidos en la matriz de transición. En este caso, cada elemento de la matriz S corresponde al valor medio de su intervalo respectivo, salvo en el último estado, donde se utiliza el valor mínimo observado del PCI, con el fin de capturar de manera más conservadora el extremo inferior de la distribución.

Con las tres matrices construidas (matriz de transición, matriz de estado inicial y matriz S), se lleva a cabo la proyección del desempeño del pavimento a 20 años mediante la iteración del modelo de Markov. Esta proyección permite obtener la evolución esperada del estado del pavimento en función del tiempo, identificando tendencias de deterioro bajo las condiciones actuales de uso y sin intervención.

Para validar la capacidad predictiva del modelo, se aplica un proceso de validación cruzada utilizando un enfoque de tipo k-fold. En primera instancia, se realiza una partición aleatoria de la base de datos en cinco grupos equivalentes. Se seleccionan cuatro de estos grupos para la calibración del modelo y el restante para su validación. Esta rotación se repite hasta utilizar cada uno de los cinco subconjuntos como conjunto de validación una vez, completando un ciclo de cinco validaciones.

Este proceso se repite en su totalidad 20 veces, generando nuevas particiones aleatorias en cada iteración. Como resultado, se obtienen 100 modelos distintos, cada uno con su respectiva curva de deterioro proyectada. Esta metodología permite evaluar la robustez y estabilidad de los resultados, así como estimar el nivel de incertidumbre asociado a la predicción del desempeño del pavimento bajo diferentes particiones de los datos.

Este enfoque probabilístico, respaldado por una validación cruzada exhaustiva, permite establecer curvas de deterioro específicas para cada aeropuerto considerado, adecuadas a sus condiciones particulares y basadas en evidencia empírica robusta.

Finalmente, una vez generados los 100 modelos de deterioro a través del proceso de validación cruzada descrito previamente, se procedió a realizar la proyección gráfica de los resultados. Para ello, se calcularon las curvas de deterioro promedio a lo largo del horizonte de 20 años, así como también los valores correspondientes al percentil 25 y percentil 75 en cada uno de los puntos temporales. Estas curvas permiten visualizar de manera conjunta el comportamiento central esperado del pavimento (curva promedio) y el rango de variabilidad en el que podrían situarse los escenarios más optimistas y pesimistas (representados por los percentiles).

5. Modelos Realizados

5.1 Aeródromo La Florida

Para el caso del Aeródromo La Florida, ubicado en la ciudad de La Serena, se desarrolló un modelo de deterioro del pavimento enfocado exclusivamente en la pista de aterrizaje y despegue utilizando datos entre 2014 y 2019, ya que los posteriores a esta presentan algún tipo de mantenimiento o reparación en la pista. Esta pista fue previamente segmentada en dos zonas diferenciadas: Pista 1, correspondiente al eje central donde se produce la mayor concentración de esfuerzos estructurales por el tránsito de aeronaves; y Pista 2, que abarca las franjas laterales o bordes, zonas que no se encuentra sometida a cargas de tránsito aéreo, sino que la mayor parte de su deterioro se debe a condiciones climáticas.

En el caso de Pista 1, luego de aplicar un proceso limpieza y validación de datos se obtuvo un total de 280 transiciones válidas. Estas transiciones corresponden a cambios en el valor del PCI de un mismo punto de muestreo entre años consecutivos. Los valores observados de PCI para esta pista se encuentran en un rango acotado entre 100 y 60. A partir de esta información, se establecieron 10 estados discretos, dividiendo el rango completo en intervalos de 4 puntos PCI por estado, lo que permitió conformar una matriz de transición de tamaño 10x10 con adecuada distribución de frecuencias en todos los estados.

Adicionalmente, para la Pista 1 del Aeródromo La Florida, se realizó un análisis complementario al modelo de deterioro ya establecido, con el fin de evaluar la sensibilidad del modelo ante la variación del último valor del rango definido en la matriz de estados. Inicialmente, este valor había sido fijado de forma arbitraria en 60 puntos PCI, considerando que los datos disponibles no incluían observaciones

por debajo de dicho umbral. No obstante, con el propósito de explorar el impacto de este parámetro en los resultados de la modelación, se ensayaron dos nuevas alternativas: en primer lugar, se definió el último valor del rango como el promedio aritmético entre 0 y 64 (el rango completo teórico del PCI), es decir, un valor de 32; y en segundo lugar, se construyó una matriz de transición de 9x9 en lugar de 10x10, eliminando el último rango que abarca entre 0 y 64, el cual carece prácticamente de registros observados. Estas tres configuraciones se compararon a través de las curvas de deterioro proyectadas, las cuales se ilustran en la Figura 7.

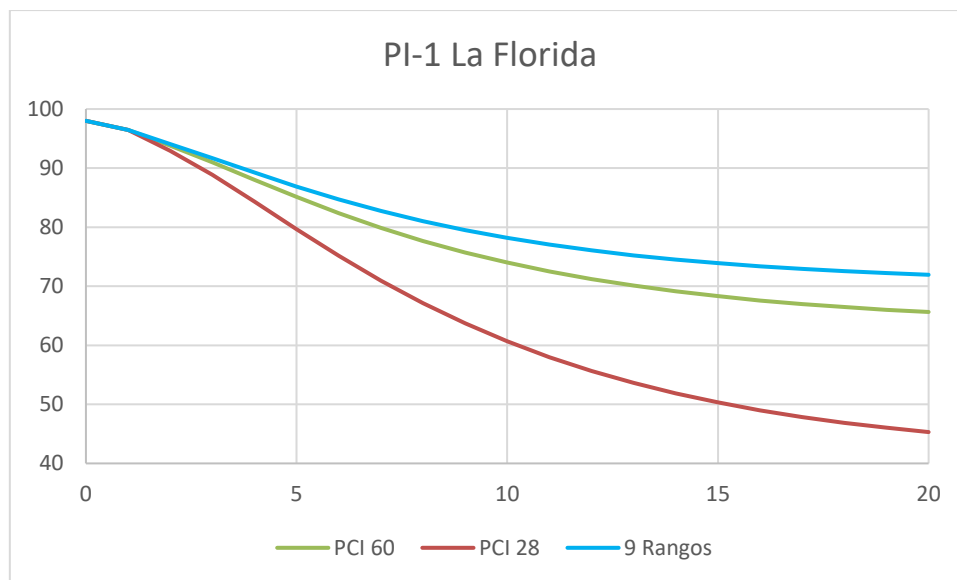


Figura 7. Comparación de curvas de deterioro según configuración del último rango.

A nivel general, se observó que las diferencias entre los modelos son marginales en los primeros años de la proyección, especialmente en los tramos del PCI superiores a 80 puntos, que corresponden precisamente al intervalo en el cual se concentra la mayor parte de las observaciones reales. Esto sugiere que las modificaciones en el último valor de la matriz de rangos tienen un impacto limitado en la modelación del deterioro en los primeros estados, siempre que el modelo se inicie en un estado representativo de los datos disponibles.

En cambio, las diferencias se tornan más notorias en los últimos años del horizonte de análisis, particularmente cuando el PCI proyectado comienza a situarse en rangos inferiores a 60 puntos. No obstante, es importante recalcar que en dichos rangos no existen datos empíricos que respalden o refuten las proyecciones realizadas, por lo cual cualquier comportamiento observado en esa zona debe interpretarse con cautela. En este sentido, los resultados reflejan que, en ausencia de información confiable en los estados más deteriorados, las diferencias entre configuraciones del modelo corresponden más a una extrapolación matemática que a una estimación basada en evidencia.

El análisis de sensibilidad realizado demuestra que la elección del valor final en la matriz de rangos no afecta significativamente los resultados del modelo en los estados de PCI con mayor densidad de observaciones. Sin embargo, también revela la importancia de contar con registros históricos más completos, especialmente en las etapas finales del ciclo de vida del pavimento, para mejorar la validez de las proyecciones en escenarios de deterioro avanzado.

Respecto a Pista 2, se obtuvieron 560 transiciones válidas posterior a la depuración de datos. El rango de valores PCI observado en esta zona abarca desde 100 hasta 50. No obstante, se identificó que tanto en los extremos superiores (por sobre PCI 88) como en los inferiores (bajo PCI 60) existía una baja densidad de datos, lo cual podría haber afectado la estabilidad estadística de la matriz de transición. Para evitar que los estados con escasa información generaran matrices degeneradas o transiciones improbables, se decidió utilizar la misma estructura de rangos que para Pista 1, manteniendo la división en tramos de 4 puntos PCI.

Sin embargo, a fin de mejorar el comportamiento del modelo durante la simulación y evitar que el sistema se quedara atascado en rangos sin observaciones suficientes, se ajustó la matriz de estado inicial. En este caso, se definió una matriz con un valor 1 ubicado en la cuarta posición del vector, lo que equivale a asumir que el pavimento comienza su evolución desde un estado de PCI entre 88 y 84, y valores 0 en el resto de las posiciones. Esta decisión se justificó con base en la distribución real de los datos, que mostraban una mayor concentración de observaciones en ese intervalo específico.

Con estos ajustes, se procedió a desarrollar la modelación a 20 años utilizando el modelo de cadenas de Markov previamente descrito. Los resultados obtenidos, así como las curvas de deterioro estimadas para ambas secciones de la pista, se analizan a continuación, considerando tanto la consistencia interna de los modelos como su ajuste durante el proceso de validación cruzada.

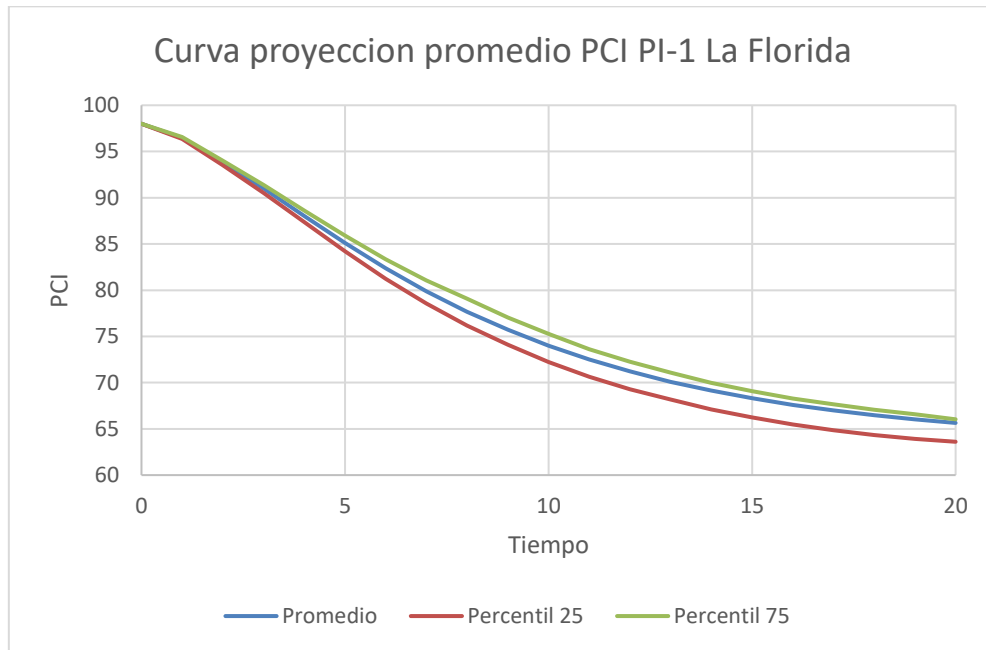


Figura 8. Curva Proyección Promedio PCI Pista 1 La Florida.

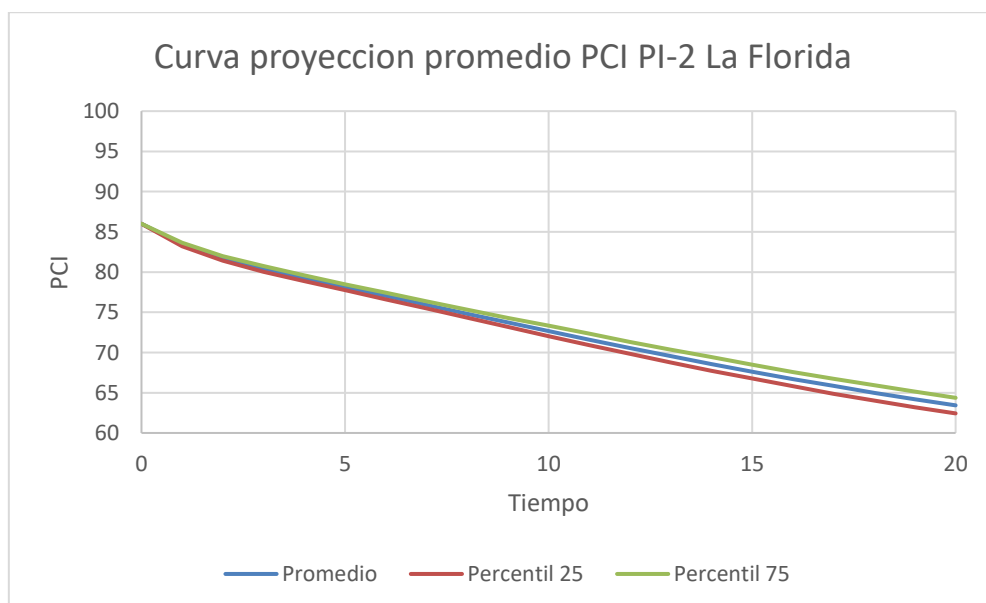


Figura 9. Curva Proyección Promedio PCI Pista 2 La Florida.

Tabla 12. Promedio métricas estadísticas La Florida.

La Florida	R2	RMSE	MAE	AIC
PI-1	0,66	6,28	3,88	211,77
PI-2	0,71	3,60	1,85	276,37

Para evaluar la precisión y robustez de los modelos desarrollados mediante cadenas de Markov en el Aeródromo La Florida, se calcularon distintas métricas estadísticas que permiten valorar el grado de ajuste entre las predicciones realizadas y los datos observados. Entre estas métricas se encuentran el coeficiente de determinación (R^2), el error cuadrático medio (RMSE), el error absoluto medio (MAE) y el criterio de información de Akaike (AIC), cada una de ellas con un propósito específico dentro del análisis.

En el caso de la Pista 1, el modelo obtuvo un coeficiente de determinación R^2 de 0,66, lo que indica que aproximadamente el 66% de la variabilidad de los datos observados de PCI puede ser explicada por el modelo generado. Este valor refleja un ajuste aceptable considerando la naturaleza probabilística del modelo de cadenas de Markov y la variabilidad inherente a los datos históricos disponibles. A nivel de error, se obtuvo un RMSE de 6,28 puntos de PCI, lo que significa que, en promedio, la diferencia entre los valores reales y los proyectados por el modelo es del orden de 6 puntos. Esta magnitud de error, si bien no es mínima, se mantiene dentro de rangos razonables para estudios de planificación y predicción en infraestructura aeroportuaria. En cuanto al MAE, el resultado fue de 3,88 puntos PCI, lo que implica que el error promedio absoluto, sin considerar la dirección del mismo, es algo menor al RMSE, sugiriendo que la mayoría de las proyecciones no presentan errores extremos ni atípicos. Por último, el modelo arrojó un AIC de 211,77, que representa un equilibrio adecuado entre ajuste estadístico y complejidad del modelo. Si bien este valor no tiene una interpretación absoluta, permite compararlo con otros modelos desarrollados sobre la misma base metodológica.

En lo que respecta a la Pista 2, los resultados reflejan un mejor rendimiento del modelo en comparación con la sección central. El coeficiente de determinación R^2 fue de 0,71, lo que indica que el 71% de la variabilidad de los valores observados es explicada por el modelo, lo que representa un mayor poder predictivo y, por lo tanto, una mayor confiabilidad. Esta mejora en el ajuste puede deberse a una menor heterogeneidad estructural, una mejor calidad de los datos o una condición más estable del pavimento en los bordes de la pista. El RMSE obtenido fue de 3,60 puntos PCI, lo cual evidencia una menor desviación entre los valores predichos y los reales en comparación con la Pista 1. Asimismo, el MAE fue de 1,85 puntos, lo que representa un error promedio bajo y confirma que las estimaciones del modelo son consistentemente cercanas a los valores observados. Sin embargo, el AIC resultante fue de 276,37, valor superior al observado en la pista central. Este aumento podría estar relacionado con una mayor dispersión en las transiciones de estado o con una estructura más compleja de la matriz de transición, lo cual eleva el costo del modelo en términos de información, pese a su buen ajuste.

5.2 Aeropuerto El Tepual

El Aeropuerto El Tepual, ubicado en la ciudad de Puerto Montt, presenta una configuración estructural más compleja en comparación con el Aeródromo La Florida, ya que su pista principal se encuentra dividida en cuatro secciones diferenciadas, tanto por su posición longitudinal como por su composición estructural. Esta segmentación responde a las distintas zonas constructivas a lo largo de la pista, así como a variaciones en las capas del pavimento, razón por la cual se consideró necesario modelar cada sección de manera independiente, a fin de reflejar con mayor precisión su comportamiento específico frente al deterioro.

Las secciones denominadas Pista 1 y Pista 3 corresponden a los tramos centrales de la pista. La primera de ellas abarca desde el PK 0 hasta el PK 2058, mientras que la segunda se extiende desde el PK 2058 hasta el PK 2652. A pesar de estar ubicadas en la zona de rodadura más crítica para las aeronaves, ambas presentan diferencias en su estructura de pavimento, lo que justifica plenamente su análisis

individualizado, ya que la capacidad de soporte, el tipo de material y la respuesta al tráfico pueden variar considerablemente entre ambas.

Por otro lado, las secciones Pista 2 y Pista 4 corresponden a los bordes laterales de la pista principal. Estas zonas, aunque comparten los mismos puntos kilométricos que las pistas centrales, también difieren en términos estructurales, lo que obliga a tratarlas como segmentos distintos dentro del proceso de modelación. En general, los bordes suelen estar sometidos a menores cargas, pero no por ello exentos de deterioro, especialmente cuando existen maniobras laterales o condiciones climáticas adversas.

En cuanto a la distribución de los datos del PCI los cuales son tomados entre 2013 y 2015, todas las secciones analizadas presentan valores dentro de un rango acotado entre 100 y 60 puntos, lo que permite aplicar una estrategia de segmentación similar a la utilizada en el Aeródromo La Florida. Por tanto, para este caso también se definieron 10 estados discretos, con intervalos de 4 puntos PCI por estado, lo que garantiza una adecuada resolución en la matriz de transición de probabilidades sin comprometer la estabilidad de los modelos por falta de observaciones en determinados rangos.

Tras aplicar el proceso de limpieza y validación de datos —eliminando registros con aumentos injustificados de PCI entre años consecutivos y verificando la consistencia de las unidades muestrales—, se obtuvieron las siguientes cantidades de transiciones válidas para cada sección: 221 para Pista 1, 231 para Pista 2, 58 para Pista 3 y 67 para Pista 4. Si bien las dos primeras secciones disponen de una base de datos relativamente robusta, las secciones 3 y 4 presentan una menor cantidad de observaciones, lo que podría influir en la estabilidad estadística de sus respectivas matrices de transición. No obstante, se decidió incluirlas en la modelación con el fin de obtener una visión completa del deterioro de toda la pista.

Con esta información, se procedió a construir los modelos de deterioro mediante cadenas de Markov para cada una de las cuatro secciones, utilizando el mismo enfoque metodológico descrito previamente.

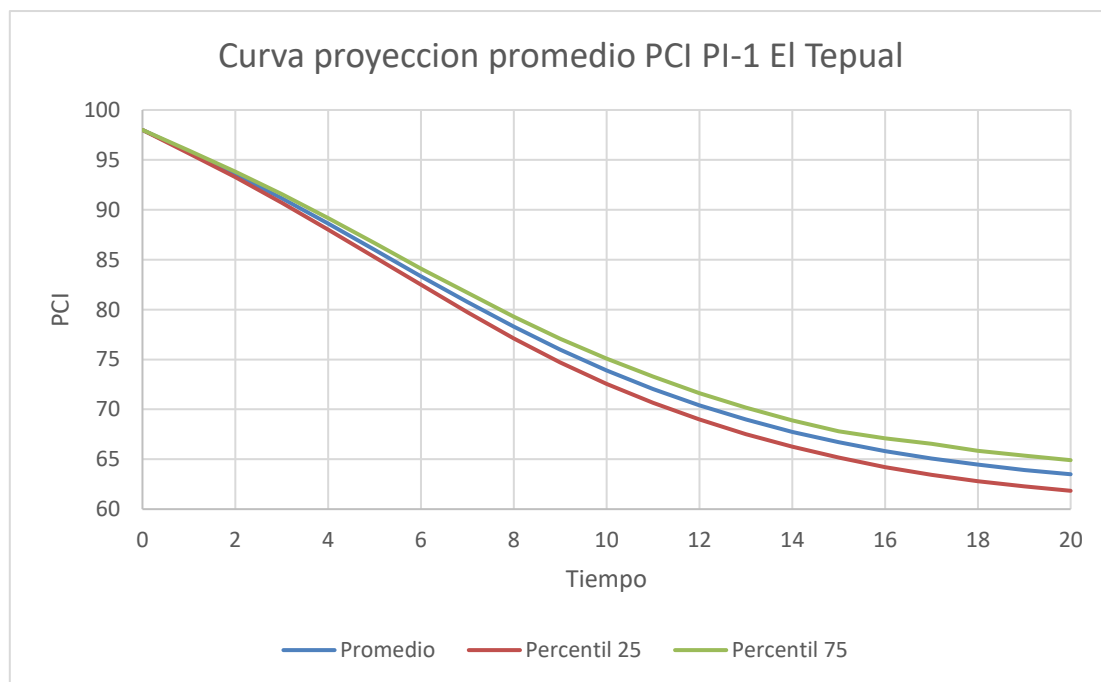


Figura 10. Curva Proyección Promedio PCI Pista 1 El Tepual.

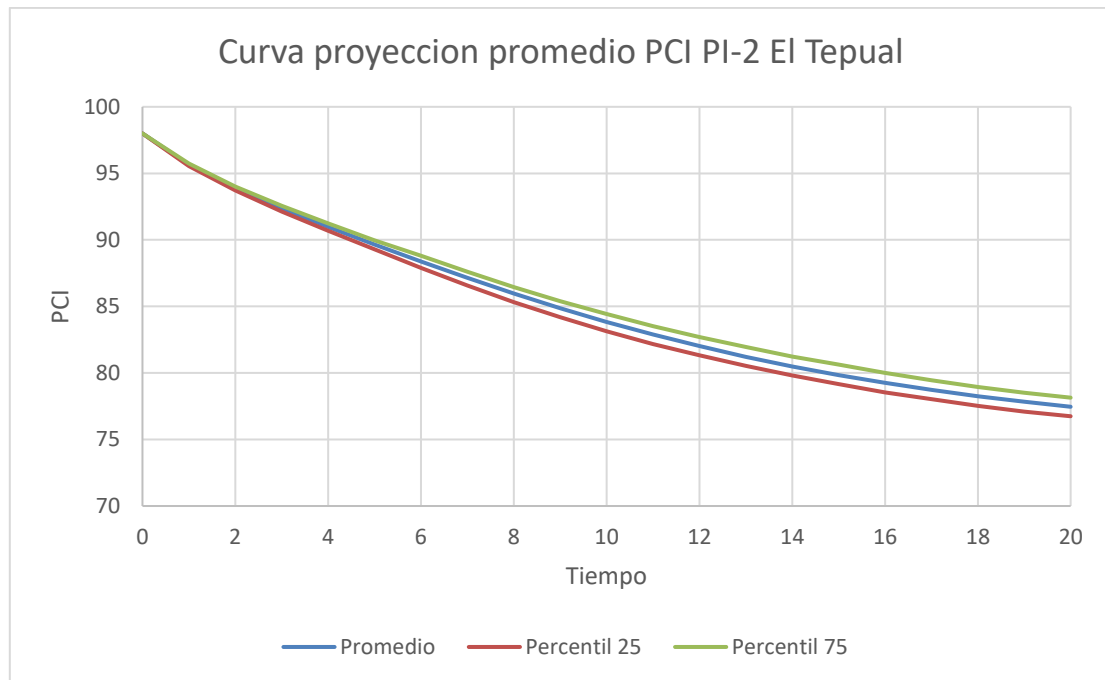


Figura 11. Curva Proyección Promedio PCI Pista 2 El Tepual.

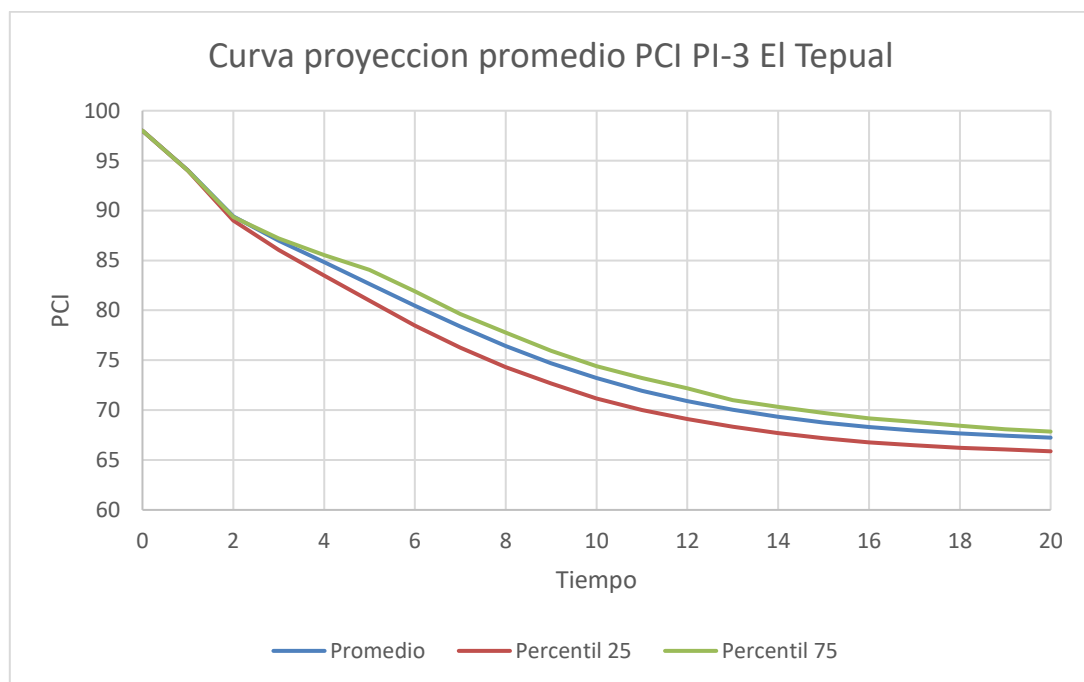


Figura 12. Curva Proyección Promedio PCI Pista 3 El Tepual.

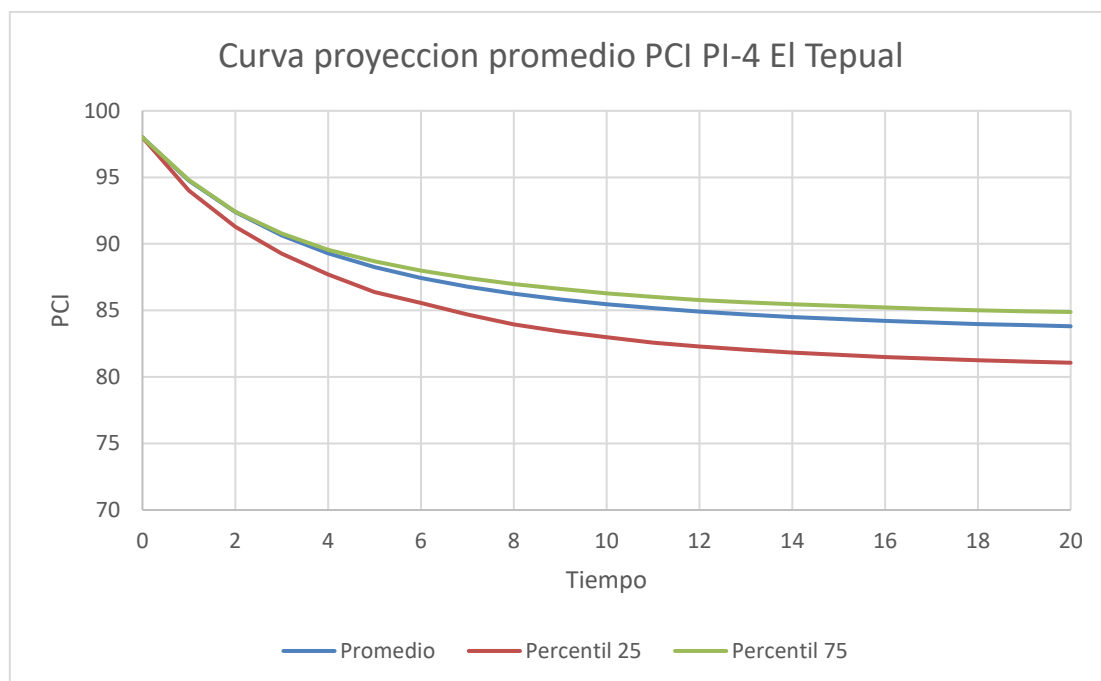


Figura 13. Curva Proyección Promedio PCI Pista 4 El Tepual.

Tabla 13. Promedio métricas estadísticas El Tepual.

El Tepual	R2	RMSE	MAE	AIC
PI-1	0,77	4,30	3,04	137,17
PI-2	0,71	3,09	2,13	110,78
PI-3	0,67	4,62	3,15	43,23
PI-4	0,62	3,77	2,66	39,96

Los modelos desarrollados para las distintas secciones de la pista del Aeropuerto El Tepual muestran en general un buen comportamiento predictivo, destacándose especialmente los resultados obtenidos para las zonas centrales. En particular, el modelo correspondiente a la sección PI-1 alcanza un coeficiente de determinación de 0,77, el más alto registrado entre todas las secciones del aeropuerto, lo que indica una capacidad de ajuste bastante sólida. A este buen desempeño se suma un RMSE de 4,30 y un MAE de 3,04, valores que reflejan una adecuada precisión en las predicciones realizadas. La combinación de un alto R^2 y errores moderados sugiere que el modelo logró capturar correctamente las transiciones de deterioro del pavimento en esta zona, la cual está sometida a las mayores exigencias estructurales por su ubicación central. El valor de AIC, que en este caso es de 137,17, se considera bajo en relación con el tamaño del conjunto de datos y respalda la eficiencia del modelo sin indicios de sobreajuste.

La sección PI-2, correspondiente al borde lateral de la pista, también presenta un desempeño muy favorable. Con un R^2 de 0,71 y errores aún más bajos que en PI-1 (RMSE de 3,09 y MAE de 2,13), este modelo demuestra una excelente precisión y estabilidad en sus proyecciones. El AIC asociado, de 110,78, refuerza la solidez del ajuste y sugiere que la estructura probabilística utilizada fue lo suficientemente representativa sin incurrir en una complejidad innecesaria. En conjunto, estos resultados indican que las condiciones del pavimento en el borde de la pista son más uniformes y predecibles, lo que favorece el desempeño del modelo.

En cuanto a la sección PI-3, también del eje central pero correspondiente a un tramo diferente, el modelo obtiene un R^2 de 0,67, lo cual, si bien es inferior al de PI-1, se mantiene dentro de rangos aceptables para este tipo de estudios. El RMSE y MAE asociados son de 4,62 y 3,15 respectivamente, valores similares a los de PI-1 pero con una ligera mayor dispersión, lo cual podría estar relacionado con una

mayor variabilidad en los datos o menor cantidad de observaciones disponibles para esa zona. El AIC de 43,23, relativamente bajo, indica que el modelo es eficiente en términos de balance entre ajuste y complejidad, lo que lo hace igualmente válido para apoyar la planificación del mantenimiento en esa sección.

Finalmente, el modelo correspondiente a PI-4, también del borde de pista, presenta un R^2 de 0,62, el más bajo entre las cuatro secciones modeladas, aunque todavía en un rango aceptable. Los errores de predicción son moderados, con un RMSE de 3,77 y un MAE de 2,66, valores que se mantienen en una magnitud que permite considerar al modelo como útil para fines de proyección. El AIC de 39,96 refuerza la eficiencia estadística del modelo, a pesar de su menor capacidad explicativa respecto a los otros casos.

5.3 Aeropuerto Andrés Sabella

El Aeropuerto Andrés Sabella, ubicado en la ciudad de Antofagasta, fue incluido en el presente estudio mediante el análisis de los datos correspondientes a los años 2017 y 2018. En este caso, la pista de aterrizaje se encuentra dividida originalmente en un total de diez secciones estructurales diferenciadas. Sin embargo, debido a la insuficiencia de datos válidos en varias de estas secciones —ya sea por falta de continuidad temporal o por ausencia de registros posteriores al mantenimiento—, solo fue posible desarrollar modelos de deterioro para las secciones 1 a 4, las cuales cuentan con un volumen de información suficiente para construir matrices de transición estadísticamente significativas.

Las secciones Pista 1 y Pista 3 corresponden al tramo central de la pista, el cual concentra el mayor tráfico de aeronaves y, por tanto, está sometido a los esfuerzos estructurales más severos. Ambas secciones comparten una estructura de pavimento idéntica, lo que justifica su agrupación para fines de modelación, permitiendo así aumentar la cantidad de transiciones disponibles y fortalecer la base de datos para el modelo. De manera análoga, las secciones Pista 2 y Pista 4, que abarcan los bordes laterales de la pista, también presentan la misma configuración estructural entre ellas, por lo cual fueron modeladas de forma conjunta.

En cuanto a los valores del PCI observados para Pistas 1 y 3 que correspondían a 71 datos, estos se encuentran dentro de un rango que va desde aproximadamente 100 hasta 55, lo que permitió definir una matriz de transición con 10 estados discretos, utilizando intervalos de 5 puntos PCI por estado. No obstante, durante el análisis exploratorio de los datos se detectó que las observaciones correspondientes a valores mayores a 90 puntos PCI eran escasas o inexistentes, lo cual podría dificultar la modelación desde un estado inicial óptimo. Para evitar problemas de estancamiento del modelo en estados con baja representatividad, se definió una matriz de estado inicial con un valor 1 en la tercera columna del vector, correspondiente a un estado PCI entre 90 y 85, y ceros en el resto de las posiciones.

Para el caso de Pistas 2 y 4, con 74 datos totales, los valores de PCI disponibles se distribuyen entre 100 y 63 puntos, y dada la menor amplitud del rango observado, se optó por dividir el mismo en intervalos de 4 puntos PCI por estado, manteniendo así la matriz de transición en formato 10x10. Al igual que en el caso de las pistas centrales, también se observó una baja presencia de datos en los rangos superiores del PCI, por lo que se utilizó la misma matriz de estado inicial, con valor 1 en la tercera columna, lo cual refleja un estado inicial intermedio y estadísticamente representativo.

Una vez definidas las matrices de transición, estado inicial y matriz S, se procedió a aplicar la metodología de modelación mediante cadenas de Markov para una proyección de 20 años. Este procedimiento fue complementado con el esquema de validación cruzada utilizado en los modelos anteriores, dividiendo aleatoriamente la base de datos en cinco subconjuntos y repitiendo el proceso 20 veces, obteniendo un total de 100 modelos de deterioro independientes.

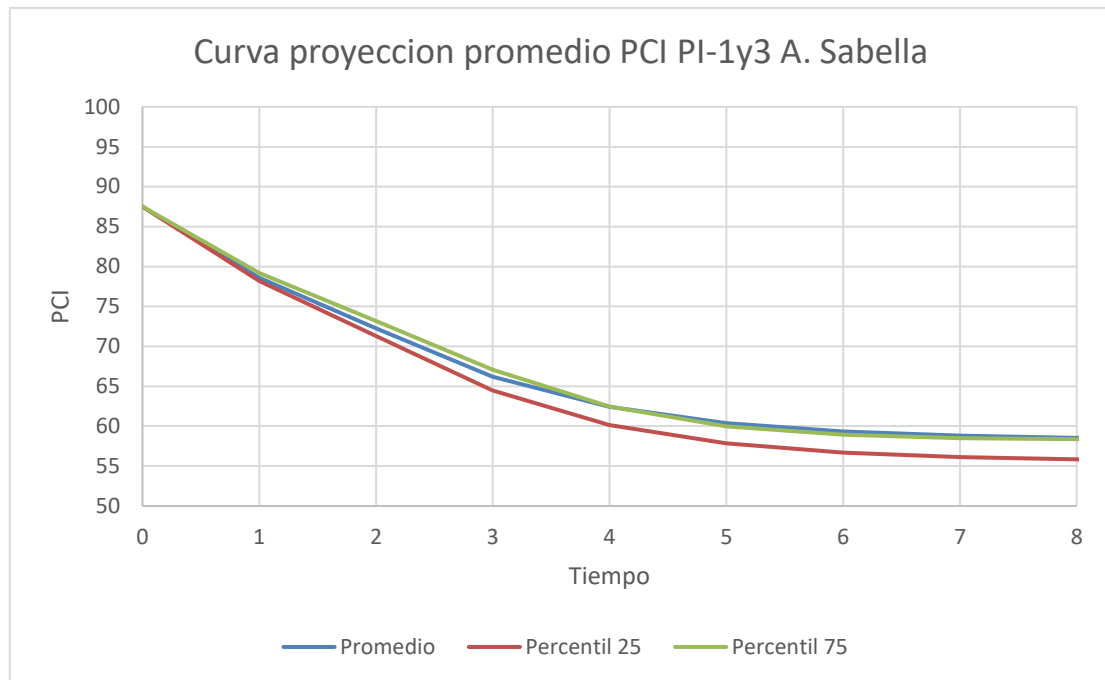


Figura 14. Curva Proyección Promedio PCI Pista 1 y 3 Andrés Sabella.

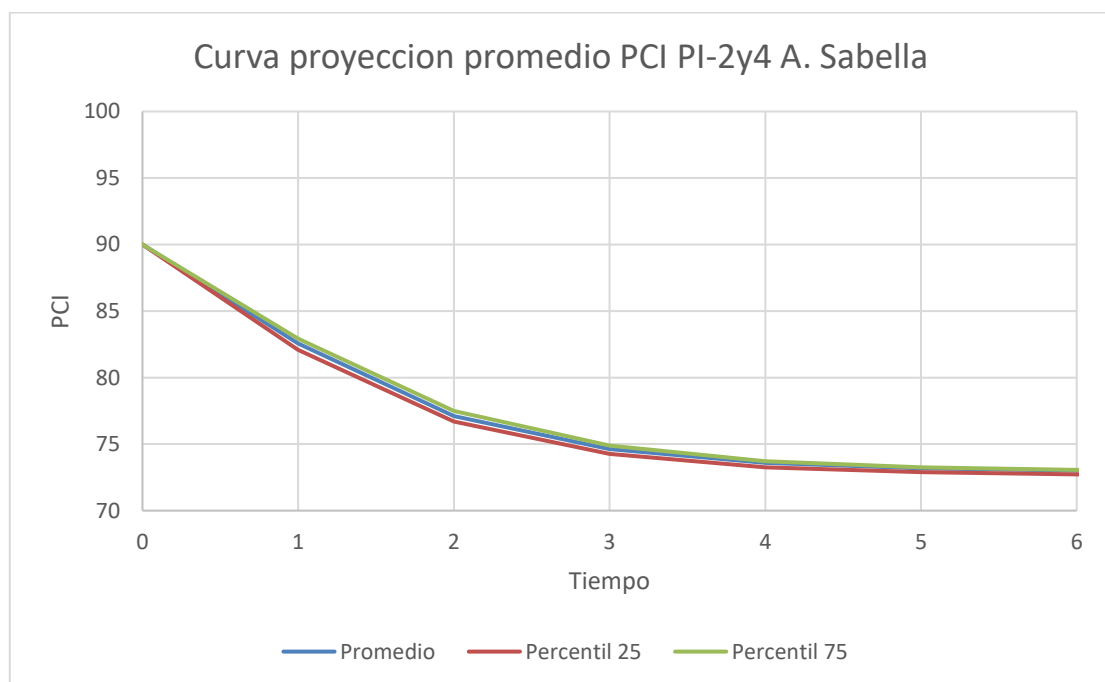


Figura 15. Curva Proyección Promedio PCI Pista 2 y 4 Andrés Sabella.

Tabla 14. Promedio métricas estadísticas Andrés Sabella.

A. Sabella	R2	RMSE	MAE	AIC
PI-1y3	-0,03	6,57	5,32	62,82
PI-2y4	0,16	3,98	3,14	50,31

Los resultados obtenidos para el Aeropuerto Andrés Sabella presentan un desempeño significativamente más limitado en comparación con los aeropuertos analizados previamente. En el caso de las secciones PI-1 y PI-3, que fueron agrupadas por compartir la misma estructura y ubicarse en la parte central de la pista, el modelo arrojó un coeficiente de determinación R^2 negativo, específicamente de -0,03. Este valor indica que el modelo no solo no logra explicar la variabilidad de los datos, sino que su desempeño es incluso peor que una simple media de los valores observados, lo cual sugiere una falta de capacidad predictiva efectiva. Este bajo nivel de ajuste podría deberse a la escasa cantidad de datos disponibles, a la falta de variabilidad en los estados observados o a inconsistencias no detectadas en los registros históricos. En términos de error, se obtuvo un RMSE de 6,57 y un MAE de 5,32, lo que refleja una dispersión considerable entre los valores proyectados y los reales, con errores promedio altos que limitan la confiabilidad del modelo. A pesar de ello, el valor del AIC (62,82) no es excesivamente alto, lo que sugiere que el modelo, si bien simple, no incurre en una penalización significativa por sobreajuste, aunque su capacidad de predicción sigue siendo deficiente.

Por otro lado, las secciones PI-2 y PI-4, correspondientes a los bordes de la pista y también agrupadas por su similitud estructural, muestran un desempeño algo mejor, aunque aún insuficiente. El valor de R^2 alcanza 0,16, lo que indica que el modelo explica solo el 16% de la variabilidad de los datos observados. Si bien este resultado representa una ligera mejora respecto a la sección central, sigue estando por debajo del umbral mínimo que generalmente se considera aceptable para modelos de comportamiento estructural en pavimentos. Los errores, en este caso, fueron de menor magnitud, con un RMSE de 3,98 y un MAE de 3,14, lo cual indica que, aunque el modelo es impreciso en términos de ajuste global, las predicciones individuales presentan una dispersión moderada. El AIC, con un valor de 50,31, refuerza la idea de que se trata de un modelo estadísticamente sencillo, sin una carga excesiva de complejidad, aunque nuevamente con una capacidad explicativa limitada.

5.4 Aeródromo Balmaceda

El Aeródromo Balmaceda, ubicado en la Región de Aysén, fue incluido dentro del conjunto de recintos aeroportuarios seleccionados para la modelación del deterioro de pavimentos. Para este caso, se consideraron datos correspondientes a los años 2014 y 2016, los cuales permitieron realizar un análisis limitado, debido a la escasa disponibilidad de información continua y representativa en algunas de sus secciones.

La pista de aterrizaje del aeródromo está segmentada en cuatro secciones, dos correspondientes al tramo central de rodadura (Pistas 1 y 3) y dos a los bordes laterales (Pistas 2 y 4). Sin embargo, al analizar las estructuras de pavimento asociadas a cada una, se identificó que todas las secciones presentan configuraciones estructurales distintas, por lo que no fue posible agruparlas para aumentar el tamaño muestral, como sí se hizo en casos anteriores.

En particular, las secciones Pista 1 y Pista 2 presentaban una cantidad de datos extremadamente reducida, lo cual impidió construir matrices de transición con una base estadística suficiente para aplicar el modelo de cadenas de Markov. Por esta razón, se descartaron del análisis y el proceso de modelación se llevó a cabo exclusivamente sobre las secciones Pista 3 y Pista 4, que sí contaban con un número aceptable de observaciones y continuidad entre las mediciones.

En el caso de Pista 3, con 51 datos disponibles, correspondiente al eje central de un tramo de la pista, los valores del PCI disponibles se encontraban en un rango entre 100 y 30 puntos, lo que reflejaba una mayor dispersión en las condiciones del pavimento respecto a otros aeropuertos analizados. Debido a esta amplitud, se optó por dividir el rango en intervalos de 7 puntos PCI, obteniendo así 10 estados discretos para la construcción de la matriz de transición. Adicionalmente, se definió una matriz de estado inicial uniforme, en la cual se asumió que todo el pavimento comenzaba en el mejor estado posible (primer estado), en línea con el criterio adoptado para otros recintos cuando no se presentaban registros en rangos superiores.

En cuanto a Pista 4, con 86 datos disponibles correspondiente a uno de los bordes de la pista, el rango de datos disponibles oscilaba entre 92 y 25 puntos PCI, mostrando una distribución similar a la del eje central, aunque con una ligera mayor concentración de observaciones en los estados intermedios e

inferiores. Se utilizó la misma partición de estados (intervalos de 7 puntos) para mantener coherencia metodológica, y se mantuvo la misma matriz de condición inicial, con la totalidad del pavimento comenzando en el primer estado (condición óptima).

Una vez definidas las matrices de transición, la matriz de estado inicial y la matriz de valores promedio (matriz S), se procedió con la modelación a 20 años mediante cadenas de Markov. El proceso incluyó nuevamente la aplicación de validación cruzada, a través de la partición aleatoria de los datos en cinco grupos, repitiendo el proceso en 20 iteraciones, lo que permitió generar un total de 100 modelos distintos para cada sección evaluada.

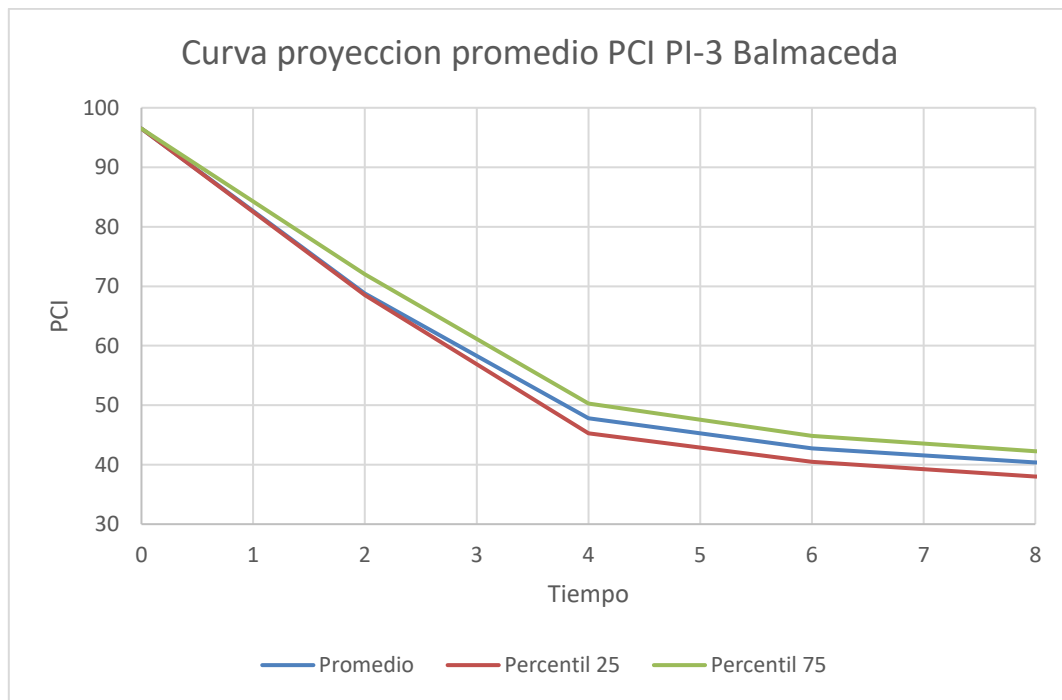


Figura 16. Curva Proyección Promedio PCI Pista 3 Balmaceda.

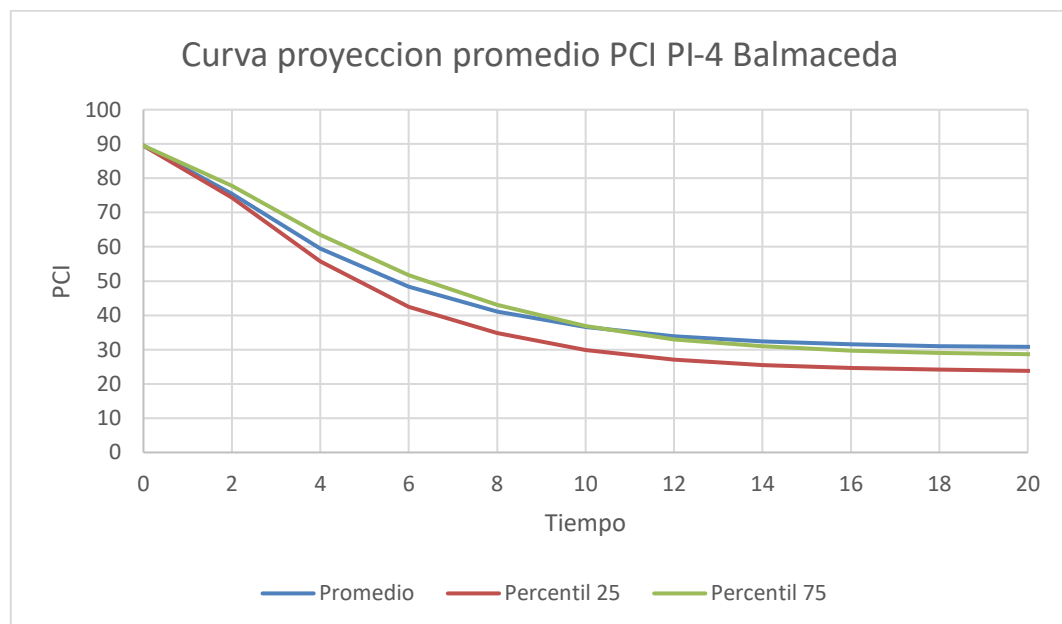


Figura 17. Curva Proyección Promedio PCI Pista 4 Balmaceda.

Tabla 15. Promedio métricas estadísticas Balmaceda.

Balmaceda	R2	RMSE	MAE	AIC
PI-3	-0,05	13,55	11,21	62,71
PI-4	0,00	14,07	11,33	100,37

Los modelos desarrollados para el Aeródromo Balmaceda, correspondientes a las secciones PI-3 y PI-4, presentan un desempeño general considerablemente limitado, lo que refleja dificultades importantes en la capacidad de predicción de las cadenas de Markov aplicadas en este caso particular. Ambos modelos se construyeron con base en los datos disponibles entre los años 2014 y 2016, sin embargo, el volumen y la dispersión de los datos utilizados, junto con la presencia de valores extremos, parecen haber influido negativamente en la estabilidad de los resultados.

En el caso de la Pista 3, el modelo arrojó un coeficiente de determinación R^2 de -0,05, lo que indica que el modelo no es capaz de explicar la variabilidad de los datos, presentando incluso un desempeño inferior al que se obtendría al utilizar simplemente la media de los valores observados como predicción. Esta deficiencia en el ajuste se refleja también en los errores de estimación, con un RMSE de 13,55 y un MAE de 11,21, los cuales son considerablemente superiores a los registrados en los demás aeropuertos incluidos en este estudio. Estos valores implican que las predicciones realizadas por el modelo se desvían, en promedio, en más de 11 puntos PCI respecto de los datos reales, lo cual limita seriamente la utilidad del modelo para cualquier tipo de planificación o diagnóstico de mantenimiento. El AIC asociado fue de 62,71, un valor que, aunque bajo en términos absolutos, no compensa el bajo desempeño predictivo, ya que se trata de un modelo estadísticamente simple pero ineficiente.

Para la Pista 4, correspondiente a uno de los bordes de la pista, el modelo obtuvo un R^2 de 0,00, lo que indica una ausencia total de correlación entre los valores proyectados y los observados. En este caso, el RMSE alcanzó los 14,07 y el MAE fue de 11,33, valores que incluso superan levemente a los obtenidos en PI-3, confirmando que las predicciones son altamente imprecisas y no representan adecuadamente el comportamiento real del pavimento. A diferencia de lo observado en PI-3, el AIC en esta sección fue más alto (100,37), lo cual podría estar relacionado con una distribución aún más irregular de las transiciones de estado o con una mayor cantidad de estados poco representados dentro de la matriz de transición.

6. Conclusiones y Recomendaciones

El presente estudio tuvo como objetivo principal desarrollar modelos del comportamiento del pavimento para aeropuertos pertenecientes a la red primaria de Chile, utilizando como base la información histórica del Índice de Condición del Pavimento y aplicando cadenas de Markov como herramienta de modelación probabilística. Si bien se logró construir y validar modelos para cuatro aeropuertos y aeródromos específicos, uno de los principales hallazgos de esta investigación radica en la marcada limitación que presenta la calidad y disponibilidad de los datos existentes, aspecto que afecta directamente la precisión, aplicabilidad y proyección de los modelos desarrollados.

Una primera conclusión relevante tiene relación con la escasez de series temporales consistentes de PCI. Durante la etapa de revisión de la base de datos se identificó que, si bien existe información dispersa sobre el estado del pavimento en distintos aeropuertos, gran parte de estos registros no puede ser utilizado para modelación debido a la falta de continuidad en las auscultaciones, ausencia de reportes de mantenimiento o errores de recolección evidentes. Casos como aumentos de PCI en un mismo punto sin documentación de intervención, o cambios estructurales no registrados en las unidades muestrales, obligaron a descartar una cantidad significativa de datos. Esta situación limita de manera considerable la capacidad de realizar análisis longitudinales robustos y, por lo tanto, reduce el universo de aeropuertos que pueden ser efectivamente modelados.

En efecto, de los 17 aeropuertos y aeródromos de la red primaria, solo cuatro cumplieron con los criterios mínimos de consistencia y trazabilidad necesarios para implementar un modelo confiable: el Aeródromo

La Florida, el Aeropuerto El Tepual, el Aeropuerto Andrés Sabella y el Aeródromo Balmaceda. La aplicación de un proceso de limpieza de datos permitió asegurar que los resultados estuvieran fundamentados en mayor medida posible, pero al mismo tiempo dejó en evidencia las limitaciones estructurales del sistema de gestión de datos actual. En este sentido, se concluye que uno de los principales desafíos para avanzar en la gestión predictiva de pavimentos aeroportuarios en Chile no es únicamente metodológico, sino que radica en mejorar la calidad, sistematicidad y cobertura de los datos recopilados.

En cuanto a los modelos construidos, los resultados obtenidos son dispares y reflejan la influencia directa que tiene la calidad de los datos sobre la precisión del modelo. El Aeródromo La Florida y el Aeropuerto El Tepual presentaron métricas de ajuste que permiten considerar sus modelos como aceptables para fines de proyección y planificación. En ambos casos, los valores del coeficiente de determinación (R^2) superaron el 0,60, con errores moderados tanto en el RMSE como en el MAE. Esto sugiere que, cuando se dispone de datos limpios, continuos y suficientemente representativos, las cadenas de Markov son una herramienta válida y eficiente para anticipar el deterioro del pavimento. Por otro lado, en el caso del Aeropuerto Andrés Sabella y especialmente del Aeródromo Balmaceda, los modelos mostraron un bajo o nulo poder predictivo, con valores de R^2 negativos o cercanos a cero, y errores superiores a los 10 puntos PCI en promedio. Esto refuerza la idea de que incluso la mejor metodología no puede compensar una base de datos deficiente, y subraya la importancia de contar con registros adecuados para obtener resultados confiables. Cabe recalcar que estos errores tanto en el Aeropuerto Andrés Sabella y el Aeródromo Balmaceda, se deben a la pequeña cantidad de datos con los cuales se disponía, tanto a nivel de auscultaciones a lo largo de los años, como por la cantidad de unidades muestrales de las secciones.

En vista de estos resultados, se plantean las siguientes recomendaciones para futuras investigaciones y para los organismos responsables de la gestión de infraestructura aeroportuaria:

- **Fortalecer la recolección de datos:** Es fundamental implementar un protocolo estandarizado de auscultación de pavimentos en toda la red primaria, que incluya la periodicidad mínima de mediciones, la documentación obligatoria de cualquier tipo de intervención y el registro detallado de características estructurales y operativas. Esto permitirá construir series de datos confiables, base indispensable para aplicar cualquier modelo predictivo.
- **Crear un sistema unificado de gestión de información:** Se recomienda desarrollar e implementar un sistema centralizado de gestión de pavimentos aeroportuarios, que almacene, procese y consolide toda la información relevante en una única plataforma. Este sistema debe estar disponible para todos los actores técnicos y debe incluir funcionalidades para alertar sobre inconsistencias o datos faltantes.
- **Capacitación y control de calidad:** Es necesario capacitar al personal encargado de las auscultaciones y validación de datos en los distintos aeropuertos, de modo de reducir los errores humanos durante el proceso de medición. Además, se recomienda establecer un mecanismo de control de calidad independiente que valide los informes antes de integrarlos a la base de datos oficial.
- **Avanzar en la validación de modelos más complejos:** Si bien las cadenas de Markov han demostrado ser una herramienta adecuada, en el futuro podrían evaluarse metodologías más complejas como redes neuronales o modelos bayesianos, especialmente si se mejora la calidad de los datos disponibles. Esto permitiría capturar relaciones no lineales y patrones ocultos en los procesos de deterioro.
- **Focalizar la planificación de mantenimiento:** Mientras no se cuente con modelos generalizables para toda la red, se recomienda que los recursos de mantenimiento se planifiquen con base en modelos específicos por aeropuerto, tal como se realizó en esta memoria. Esta estrategia permite una mayor precisión y evita extrapolaciones incorrectas entre recintos que pueden diferir significativamente en clima, estructura y tráfico.

7. Referencias

- AASHTO. (1993). *Design of Pavement Structures*.
- Airport Engineering Division AAS-, F. (2014). *AC 150/5380-7B, Airport Pavement Management, 10/10/2014*. http://www.faa.gov/airports/resources/advisory_circulars/.
- Alharbi, F., Hallmark, S., Savolainen, P., Shane, J., & Hu, G. (2018). *Predicting pavement performance utilizing artificial neural network (ANN) models*.
- Alvarez, J. J. (2020). *ESTRUCTURACIÓN Y DESARROLLO DE UNA BASE DE DATOS PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE GESTIÓN DE PAVIMENTOS AEROPORTUARIOS PARA LA RED PRIMARIA DE AEROPUERTOS DE CHILE*.
- Ansarilari, Z., & Golroo, A. (2020). Integrated airport pavement management using a hybrid approach of Markov Chain and supervised multi-objective genetic algorithms. *International Journal of Pavement Engineering*, 21(14), 1864–1873. <https://doi.org/10.1080/10298436.2019.1571208>
- ASTM. (1998). *Standard Test Method for Airport Pavement Condition Index Surveys*.
- ASTM D5340-24. (2024). *ASTM D5340-24. Standard Test Method for Airport Pavement Condition Index Surveys*.
- Camarena, K. A. (2018). *Implementación de un sistema de gestión de pavimentos para el área de movimiento de aeropuertos*.
- Chile Atiende GOB. (2024). *Dirección General de Aeronáutica Civil. ChileAtiende*. <https://www.chileatiende.gob.cl/instituciones/AD020>.
- DAP. (2024). *Dirección de Aeroportos. DAP*. <https://aeropuertos.mop.gob.cl/direccion-de-aeropuertos/>.
- DGAC. (2025). *Red Aeroportuaria Nacional. Dirección General de Aeronautica Civil de Chile*. <https://www.dgac.gob.cl/aeropuertos/red-aeroportuaria-nacional/red-aeroportuaria/>.
- Federal Aviation Administration FAA. (2022). *Airport Obligations: Pavement Maintenance. Federal Aviation Administration*. https://www.faa.gov/airports/central/airport_compliance/pavement_maintenance?utm_source=chatgpt.com.
- Golroo, A., & Tighe, S. L. (2012). Development of Pervious Concrete Pavement Performance Models Using Expert Opinions. *Journal of Transportation Engineering*, 138(5), 634–648. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)TE.1943-5436.0000356](https://doi.org/10.1061/(ASCE)TE.1943-5436.0000356)
- Haas, R., W. R. Hudson, & J. Zaniewaski. (1994). *Modern Pavement Management*.
- Hosseini, S. A., & Smadi, O. (2021). How prediction accuracy can affect the decision-making process in pavement management system. *Infrastructures*, 6(2), 1–17. <https://doi.org/10.3390/infrastructures6020028>
- Issa, A., & Abu Eishah, S. (2019). *Development of pavement performance model for proper rehabilitation and maintenance using first order markov chain*.
- M. Y. Shahin. (2005). *Pavement Management for Airports, Roads, and Parking Lots*. Scholars Portal.
- Matich, D. J. (2001). *Redes Neuronales: Conceptos Básicos y Aplicaciones*.
- Montecinos, A. (2021). *Metodología y aplicación de algoritmos de machine learning en el desarrollo de modelos de desempeño de pavimentos aeroportuarios en Chile*.
- MOP. (2025). *Red Primaria: La columna vertebral. MOP*. <https://aeropuertos.mop.gob.cl/red-primaria-2/>.

- Nazer, C. (2024). *DESARROLLO DE MODELOS DE DESEMPEÑO DEL COEFICIENTE DE FRICCIÓN DE PAVIMENTOS AEROPORTUARIOS DE LA ZONA NORTE PERTENECIENTES A LA RED PRIMARIA DE CHILE*.
- NINGYUAN LI, WEI-CHAU XIE, & RALPH HAAS. (1996). *Reliability-Based Processing of Markov Chains for Modeling Pavement Network Deterioration*.
- Noruzoliaee, M., & Zou, B. (2019). Airfield infrastructure management using network-level optimization and stochastic duration modeling. *Infrastructures*, 4(1). <https://doi.org/10.3390/infrastructures4010002>
- Park, H. W., Kim, J. M., Lee, J. H., Lee, D. S., & Jeong, J. H. (2023). Pavement Condition Index Model for Mechanistic–Empirical Design of Airport Concrete Pavements Considering Environmental Effects. *Buildings*, 13(10). <https://doi.org/10.3390/buildings13102512>
- Roh, S., Lee, J., Urbino, I. J., Lin, W., & Cho, Y. (2023). Airport Pavement Maintenance Decision-Making System with Condition Cases Optimization. *Applied Sciences (Switzerland)*, 13(24). <https://doi.org/10.3390/app132413167>
- Tolmo, M. (2020). *FORMULACIÓN DE UN MARCO TEÓRICO PARA LA GESTIÓN DE PAVIMENTOS AEROPORTUARIOS, APLICABLE A LA RED NACIONAL DE AEROPUERTOS*.
- W. R. HUDSON, R. HAAS, & R. DARYL PEDIGO. (1979). *Pavement management system development*.

A. Anexo 1

A continuación, se presentan los datos de la condición del pavimento, de las distintas auscultaciones realizadas en el Aeródromo La Florida.

Tabla A – 1, Datos PCI Pista 1 Aeródromo La Florida.

UMT	2014	2015	2016	2017	2019
1	97	97	97	97	96
2	100	100	100	100	89
3	100	100	100	100	100
4	100	100	100	100	99
5	100	100	100	100	100
6	100	100	100	100	100
7	97	97	97	97	97
8	100	100	100	100	93
9	100	100	100	73	73
10	100	100	100	100	59
11	100	100	100	100	68
12	100	100	100	73	73
13	100	100	100	100	100
14	100	100	100	100	95
15	100	100	100	73	73
16	97	96	96	73	64
17	100	100	96	69	44
18	100	100	100	83	57
19	97	97	96	73	51
20	100	100	100	100	100
21	100	97	96	96	96
22	100	100	100	100	100
23	100	100	100	100	61
24	100	100	100	100	100
25	100	100	100	100	65
26	100	100	100	100	57
27	100	100	100	100	61
28	100	100	100	100	61
29	100	100	100	100	97
30	100	100	100	100	100
31	100	100	100	100	100
32	100	100	100	100	100
33	100	100	100	100	72
34	100	100	100	100	61
35	100	100	100	100	65
36	100	100	100	100	68
37	97	97	96	96	96
38	100	100	100	100	94

39	100	100	100	100	97
40	100	100	100	100	91
41	100	100	96	96	89
42	100	96	96	96	83
43	100	100	100	100	93
44	100	100	100	100	96
45	100	100	100	100	94
46	100	100	100	100	95
47	100	100	100	100	100
48	100	100	100	100	96
49	100	100	100	100	100
50	100	100	100	100	96
51	100	100	100	100	100
52	100	100	100	100	93
53	100	100	100	100	75
54	100	100	100	100	100
55	100	100	100	100	100
56	100	100	100	100	100
57	100	100	100	100	100
58	100	100	100	100	100
59	100	100	100	100	100

Tabla A – 2, Datos PCI Pista 2 Aeródromo La Florida.

UMT	2014	2015	2016	2017	2019
1	76	76	77	79	79
2	77	77	77	56	56
3	79	79	79	79	79
4	77	77	77	79	79
5	78	78	78	79	79
6	77	77	77	79	79
7	77	77	77	79	79
8	77	77	77	70	70
9	78	78	78	79	79
10	77	77	77	79	79
11	76	76	77	79	79
12	76	76	76	53	53
13	76	76	76	79	79
14	76	76	77	51	51
15	79	79	79	74	74
16	76	76	77	58	58
17	76	76	76	79	79
18	77	77	77	60	60
19	77	77	77	79	79

20	76	76	77	60	65
21	76	76	77	79	67
22	77	77	77	53	53
23	76	76	77	79	79
24	76	76	77	58	58
25	79	79	79	79	79
26	76	76	77	49	48
27	76	76	76	81	81
28	76	76	76	53	53
29	79	79	78	79	79
30	77	77	77	52	52
31	79	79	79	79	79
32	77	77	77	51	51
33	79	79	79	79	79
34	77	77	77	79	79
35	79	79	79	79	79
36	75	75	75	79	79
37	82	79	79	69	69
38	77	77	77	79	79
39	77	77	75	78	78
40	76	76	77	78	78
41	77	77	77	79	79
42	76	76	77	74	74
43	76	76	76	79	79
44	77	77	77	79	57
45	76	76	76	79	79
46	77	77	77	79	79
47	82	82	82	79	82
48	77	77	77	79	79
49	77	77	77	69	69
50	76	76	77	79	79
51	82	82	83	83	83
52	76	76	77	79	79
53	79	79	79	83	83
54	77	77	77	79	79
55	79	79	79	79	83
56	76	76	77	79	79
57	80	80	78	79	78
58	76	76	76	78	79
59	79	79	79	79	79
60	76	76	76	79	79
61	76	76	77	79	74
62	76	76	77	79	79
63	76	76	76	79	78

64	76	76	76	79	79
65	79	79	79	79	73
66	75	75	76	79	79
67	78	78	78	79	79
68	77	77	77	79	69
69	77	77	77	79	79
70	76	76	77	79	79
71	78	78	78	77	79
72	77	77	77	67	79
73	77	77	77	78	79
74	76	76	76	79	79
75	78	78	78	79	79
76	76	76	77	78	77
77	78	78	78	61	67
78	73	73	73	65	78
79	76	76	76	79	79
80	74	74	74	67	79
81	79	79	79	78	78
82	74	74	74	79	61
83	71	76	76	79	65
84	75	75	75	79	79
85	82	82	81	69	63
86	82	82	78	79	78
87	83	83	79	83	79
88	83	83	79	79	79
89	86	86	79	81	79
90	83	83	83	83	69
91	82	82	79	83	79
92	82	82	83	83	83
93	83	83	79	81	79
94	83	83	81	87	81
95	82	83	83	82	79
96	83	83	83	83	82
97	84	84	83	81	83
98	83	83	81	79	81
99	87	87	86	82	87
100	82	82	82	83	82
101	84	84	83	81	82
102	82	82	81	81	81
103	84	82	79	82	79
104	82	82	82	79	82
105	86	85	83	82	83
106	81	81	81	79	81
107	88	88	81	83	81

108	82	82	82	79	82
109	82	83	79	79	79
110	82	82	82	82	82
111	82	82	79	79	79
112	82	82	83	83	83
113	83	83	79	79	79
114	82	82	82	82	82
115	87	87	79	79	79
116	82	82	82	82	82
117	89	89	82	70	58
118	85	85	82	79	76

B. Anexo 2

A continuación, se presentan los datos de la condición del pavimento, de las distintas auscultaciones realizadas en el Aeropuerto El Tepual.

Tabla B – 1, Datos PCI Pista 1 Aeropuerto El Tepual.

UMT	2013	2014	2015
1	87	83	83
2	82	79	78
3	92	93	93
4	90	81	81
5	98	98	98
6	80	82	82
7	93	93	93
8	98	98	98
9	98	98	98
10	98	98	98
11	98	98	98
12	97	97	97
13	98	96	96
14	97	94	93
15	98	96	96
16	98	96	96
17	98	98	98
18	95	93	93
19	98	98	98
20	98	98	98
21	98	98	98
22	98	98	98
23	96	84	84
24	93	92	92
25	98	96	96
26	98	97	97

27	98	96	96
28	98	92	92
29	93	93	93
30	93	89	89
31	98	98	98
32	96	94	94
33	98	98	98
34	97	93	93
35	98	94	94
36	95	86	86
37	95	94	94
38	94	93	93
39	95	95	95
40	98	98	98
41	98	98	98
42	98	98	98
43	96	93	93
44	82	91	91
45	93	77	76
46	97	88	88
47	95	95	95
48	93	83	81
49	87	80	74
50	85	78	70
51	98	92	84
52	94	81	82
53	87	93	89
54	92	83	76
55	96	96	96
56	98	93	93
57	88	78	79
58	81	57	70
59	85	75	80
60	60	41	48
61	98	96	96
62	98	92	92
63	89	91	91
64	83	75	72
65	96	90	85
66	98	77	77
67	98	92	92
68	98	94	94
69	97	97	97
70	98	94	94

71	98	96	96
72	87	80	80
73	92	89	89
74	98	98	98
75	96	95	98
76	94	92	86
77	91	94	88
78	98	92	92
79	96	94	92
80	98	92	88
81	91	81	75
82	95	85	81
83	98	98	98
84	98	95	90
85	89	79	79
86	91	78	77
87	96	94	94
88	76	66	71
89	94	93	93
90	87	83	82
91	97	91	88
92	98	98	98
93	57	67	76
94	89	67	82
95	96	93	93
96	96	95	95
97	68	84	91
98	95	96	96
99	96	94	94
100	90	89	89
101	98	96	96
102	98	98	98
103	94	92	92
104	83	74	74
105	96	89	89
106	87	82	83
107	96	96	96
108	83	80	80
109	96	90	90
110	98	93	93
111	96	96	93
112	94	88	86
113	94	79	80
114	77	81	82

115	59	71	67
116	72	67	79
117	73	63	78
118	68	52	61

Tabla B – 2, Datos PCI Pista 2 Aeropuerto El Tepual.

UMT	2013	2014	2015
1	86	64	72
2	90	90	90
3	93	90	92
4	93	82	85
5	98	96	96
6	93	91	91
7	93	98	98
8	93	96	96
9	98	93	94
10	98	98	98
11	98	94	96
12	98	92	92
13	96	92	94
14	98	94	94
15	98	95	95
16	98	90	90
17	96	90	90
18	93	96	96
19	88	91	91
20	98	87	80
21	98	98	98
22	93	98	98
23	93	92	94
24	93	96	96
25	98	96	96
26	98	96	96
27	98	90	93
28	98	96	96
29	98	94	94
30	98	96	96
31	98	96	96
32	98	95	95
33	98	93	93
34	98	98	98
35	98	93	95
36	98	98	98

37	98	96	96
38	98	93	93
39	98	98	98
40	83	83	83
41	98	96	96
42	79	80	82
43	93	96	96
44	82	82	82
45	96	93	94
46	98	98	98
47	96	93	93
48	90	86	86
49	91	88	93
50	93	92	88
51	93	92	94
52	90	90	90
53	93	98	98
54	98	98	98
55	93	93	93
56	98	98	98
57	98	98	98
58	91	90	90
59	96	96	96
60	88	80	81
61	98	94	96
62	98	98	95
63	98	98	98
64	93	95	93
65	98	96	96
66	99	91	91
67	96	94	94
68	88	96	95
69	98	98	98
70	98	92	95
71	98	98	98
72	96	98	92
73	98	93	96
74	98	98	98
75	98	96	96
76	98	98	98
77	98	98	98
78	98	96	96
79	98	92	95
80	93	87	93

81	98	98	98
82	92	80	87
83	91	89	89
84	95	82	82
85	85	77	82
86	98	96	96
87	81	78	80
88	89	93	93
89	90	79	88
90	98	98	96
91	90	81	71
92	93	98	98
93	90	95	95
94	93	95	95
95	98	98	98
96	98	96	96
97	96	96	96
98	93	98	98
99	90	93	93
100	93	95	95
101	88	89	89
102	89	94	94
103	98	94	94
104	91	96	96
105	95	95	95
106	98	92	95
107	98	98	98
108	98	98	96
109	98	95	95
110	90	84	75
111	98	96	96
112	98	96	96
113	98	98	98
114	98	98	98
115	88	73	73
116	92	92	93
117	93	84	84
118	98	96	96

Tabla B – 3, Datos PCI Pista 3 Aeropuerto El Tepual.

UMT	2013	2014	2015
1	71	78	78
2	74	80	79

3	85	81	85
4	89	89	88
5	78	86	86
6	93	92	92
7	71	81	81
8	79	77	79
9	86	91	94
10	89	91	93
11	79	87	84
12	82	81	76
13	87	91	91
14	94	92	92
15	90	88	87
16	78	57	68
17	78	75	74
18	75	76	69
19	84	85	82
20	81	79	65
21	97	94	94
22	85	78	70
23	94	89	87
24	94	89	89
25	91	96	96
26	93	83	87
27	92	93	94
28	84	80	81
29	86	85	82
30	83	62	70
31	90	98	96
32	84	68	70
33	92	89	84
34	74	73	74

Tabla B – 4, Datos PCI Pista 4 Aeropuerto El Tepual.

UMT	2013	2014	2015
1	91	92	92
2	89	96	96
3	93	93	93
4	93	96	96
5	93	91	91
6	93	94	94
7	93	96	96
8	93	98	98

9	93	96	96
10	93	96	96
11	93	96	96
12	93	96	96
13	91	96	96
14	98	98	96
15	91	96	96
16	85	82	82
17	98	98	98
18	74	65	68
19	95	92	90
20	87	75	75
21	98	96	96
22	93	83	83
23	93	98	98
24	88	84	84
25	93	91	91
26	97	95	95
27	93	98	98
28	93	98	98
29	93	96	96
30	93	98	98
31	97	74	78
32	98	98	98
33	86	74	78
34	98	98	98

C. Anexo 3

A continuación, se presentan los datos de la condición del pavimento, de las distintas auscultaciones realizadas en el Aeropuerto Andrés Sabella.

Tabla C – 1, Datos PCI Pista 1 y 3 Aeropuerto Andrés Sabella.

PISTA	UMT	2017	2018
PI-1	1	78	85
PI-1	2	80	67
PI-1	3	82	71
PI-1	4	81	74
PI-3	1	83	86
PI-3	2	86	80
PI-3	3	100	83
PI-3	4	85	85
PI-3	5	77	78
PI-3	6	87	79
PI-3	7	79	75

PI-3	8	81	82
PI-3	9	81	79
PI-3	10	85	81
PI-3	11	82	77
PI-3	12	86	84
PI-3	13	86	87
PI-3	14	81	74
PI-3	15	81	81
PI-3	16	82	77
PI-3	17	83	79
PI-3	18	91	79
PI-3	19	81	67
PI-3	20	81	73
PI-3	21	81	83
PI-3	22	81	83
PI-3	23	69	65
PI-3	24	82	78
PI-3	25	86	80
PI-3	26	86	81
PI-3	27	82	76
PI-3	28	89	81
PI-3	29	90	84
PI-3	30	81	68
PI-3	31	81	78
PI-3	32	81	74
PI-3	33	81	80
PI-3	34	83	82
PI-3	35	86	71
PI-3	36	85	77
PI-3	37	86	69
PI-3	38	78	55
PI-3	39	83	81
PI-3	40	82	51
PI-3	41	85	78
PI-3	42	85	63
PI-3	43	82	72
PI-3	44	85	75
PI-3	45	85	84
PI-3	46	81	78
PI-3	47	80	75
PI-3	48	79	76
PI-3	49	78	71
PI-3	50	83	89
PI-3	51	87	82

PI-3	52	76	73
PI-3	53	83	82
PI-3	54	77	68
PI-3	55	79	76
PI-3	56	83	82
PI-3	57	81	88
PI-3	58	80	75
PI-3	59	79	76
PI-3	60	84	80
PI-3	61	79	80
PI-3	62	77	79
PI-3	63	87	85
PI-3	64	90	80
PI-3	65	90	70
PI-3	66	85	68
PI-3	67	73	80
PI-3	68	80	70
PI-3	69	71	51
PI-3	70	69	71
PI-3	71	76	79

Tabla C – 2, Datos PCI Pista 2 y 4 Aeropuerto Andrés Sabella.

PISTA	UMT	2017	2018
PI-2	1	75	80
PI-2	2	88	76
PI-2	3	80	83
PI-2	4	86	81
PI-4	1	77	75
PI-4	2	84	84
PI-4	3	90	80
PI-4	4	92	86
PI-4	5	79	75
PI-4	6	92	85
PI-4	7	87	74
PI-4	8	90	85
PI-4	9	88	78
PI-4	10	91	89
PI-4	11	87	75
PI-4	12	88	80
PI-4	13	82	73
PI-4	14	82	84
PI-4	15	87	73
PI-4	16	85	80

PI-4	17	81	77
PI-4	18	89	79
PI-4	19	78	77
PI-4	20	86	82
PI-4	21	78	75
PI-4	22	87	80
PI-4	23	82	73
PI-4	24	88	83
PI-4	25	83	75
PI-4	26	84	86
PI-4	27	82	74
PI-4	28	90	80
PI-4	29	80	76
PI-4	30	89	80
PI-4	31	82	76
PI-4	32	90	78
PI-4	33	81	75
PI-4	34	92	81
PI-4	35	86	77
PI-4	36	85	81
PI-4	37	84	77
PI-4	38	83	79
PI-4	39	88	75
PI-4	40	82	86
PI-4	41	80	75
PI-4	42	82	79
PI-4	43	82	77
PI-4	44	86	89
PI-4	45	84	83
PI-4	46	84	85
PI-4	47	85	80
PI-4	48	81	83
PI-4	49	79	75
PI-4	50	85	79
PI-4	51	83	72
PI-4	52	100	78
PI-4	53	80	76
PI-4	54	91	85
PI-4	55	78	73
PI-4	56	88	87
PI-4	57	80	75
PI-4	58	92	86
PI-4	59	78	73
PI-4	60	85	82

PI-4	61	78	72
PI-4	62	88	88
PI-4	63	83	80
PI-4	64	84	88
PI-4	65	78	73
PI-4	66	86	87
PI-4	67	77	63
PI-4	68	90	80
PI-4	69	80	77
PI-4	70	89	85

D. Anexo 4

A continuación, se presentan los datos de la condición del pavimento, de las distintas auscultaciones realizadas en el Aeródromo Balmaceda.

Tabla D – 1, Datos PCI Pista 3 Aeródromo Balmaceda.

UMT	2014	2016
1	28	58
2	59	38
3	69	67
4	55	30
5	66	78
6	59	78
7	78	71
8	74	52
9	81	31
10	72	39
11	66	68
12	79	76
13	76	59
14	75	87
15	49	43
16	91	59
17	83	53
18	92	92
19	88	58
20	89	74
21	90	53
22	75	70
23	82	68
24	80	53
25	74	58
26	66	73
27	55	81

28	58	39
29	82	93
30	75	66
31	76	59
32	71	65
33	86	65
34	88	68
35	14	67
36	78	65
37	77	65
38	83	60
39	74	38
40	77	72
41	80	87
42	95	55
43	88	77
44	96	91
45	93	42
46	100	60
47	90	79
48	80	70
49	44	48
50	48	59
51	63	48
52	93	42
53	68	37
54	74	54
55	63	71
56	64	77
57	66	71
58	67	40
59	57	65
60	56	71
61	76	72
62	81	49
63	89	73
64	80	61
65	93	38

Tabla D – 2, Datos PCI Pista 4 Aeródromo Balmaceda.

UMT	2014	2016
1	80	82
2	78	75

3	74	48
4	77	42
5	69	58
6	78	90
7	73	52
8	81	33
9	71	74
10	74	39
11	82	68
12	71	68
13	79	68
14	78	92
15	79	54
16	78	66
17	78	58
18	79	81
19	75	78
20	71	33
21	69	64
22	78	33
23	75	70
24	84	92
25	74	54
26	81	71
27	71	63
28	58	67
29	63	63
30	79	25
31	70	91
32	79	92
33	68	71
34	74	85
35	79	74
36	80	43
37	67	50
38	81	91
39	78	74
40	84	91
41	79	87
42	79	91
43	78	70
44	79	77
45	79	70
46	74	73

47	81	87
48	74	70
49	79	63
50	79	91
51	83	74
52	79	70
53	76	66
54	80	90
55	91	87
56	84	92
57	85	86
58	80	86
59	72	70
60	82	91
61	71	70
62	81	90
63	78	60
64	79	90
65	76	65
66	84	91
67	63	16
68	79	92
69	33	36
70	33	56
71	72	55
72	81	77
73	69	63
74	81	89
75	69	65
76	81	60
77	79	92
78	79	89
79	79	63
80	80	87
81	83	59
82	74	77
83	81	63
84	80	91
85	74	87
86	84	83
87	75	75
88	78	90
89	70	67
90	80	76

91	79	78
92	78	90
93	79	90
94	76	60
95	82	92
96	75	48
97	77	74
98	75	89
99	74	88
100	78	93
101	70	61
102	79	92
103	78	71
104	77	56
105	86	78
106	79	81
107	91	91
108	76	91
109	82	66
110	73	80
111	87	70
112	78	72
113	82	69
114	79	91
115	68	76
116	77	86
117	80	91
118	82	92
119	92	63
120	90	80
121	88	73
122	81	88
123	89	62
124	84	72
125	86	70
126	66	25
127	83	40
128	70	70
129	82	35
130	83	70