



UNIVERSIDAD TECNICA
FEDERICO SANTA MARIA

Departamento de Obras Civiles

**DESARROLLO DE METODOLOGÍA DE OPTIMIZACIÓN MULTI OBJETIVO,
MEDIANTE ALGORITMO GENÉTICO, PARA EL MANTENIMIENTO DE
PAVIMENTOS AEROPORTUARIOS EN CHILE**

Memoria de Título presentada por

Héctor Leonardo Silva Garrido

como requisito parcial para optar al título de la carrera de

Ingeniería Civil
Magister en Ciencias de la Ingeniería Civil

Profesor Guía
Felipe Araya

Marzo de 2026



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 METODOLOGÍA DE OPTIMIZACIÓN MULTIOBJETIVO MEDIANTE ALGORITMO GENÉTICO PARA EL MANTENIMIENTO DE PAVIMENTOS AEROPORTUARIOS EN CHILE**

Nombre del candidato(a): **Héctor Leonardo Silva Garrido**

Carrera / Grado: **Ingeniería Civil, Magister en ciencias de la ingeniería Civil**

Campus: Santiago _____ Departamento: **Obras Civiles** _____

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, Felipe Araya Araya _____, en mi calidad de profesor(a) guía/director(a) del trabajo académico mencionado anteriormente **DEJO CONSTANCIA** que:

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

3.- EVALUACIÓN DE CONFIDENCIALIDAD POR PROPIEDAD INDUSTRIAL (marcar una opción)

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

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

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


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

4.- FIRMAS

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

Fecha: 26/03/2026 Firma: 

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: 07/04/2026 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.



UNIVERSIDAD TECNICA
FEDERICO SANTA MARIA

TITULO DE LA TESIS:

**DESARROLLO DE METODOLOGÍA DE OPTIMIZACIÓN
MULTIOBJETIVO MEDIANTE ALGORITMO GENÉTICO PARA EL
MANTENIMIENTO DE PAVIMENTOS AEROPORTUARIOS EN CHILE**

AUTOR:

Héctor Leonardo Silva 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	Felipe Araya
Miembro 1 Comisión	Gabriel García
Miembro 2 Comisión	Alelí Osorio
Miembro 2 Comisión	Héctor Allende

Santiago, Chile, marzo de 2026

DESARROLLO DE METODOLOGÍA DE OPTIMIZACIÓN MULTIOBJETIVO MEDIANTE ALGORITMO GENÉTICO PARA EL MANTENIMIENTO DE PAVIMENTOS AEROPORTUARIOS EN CHILE

Héctor Silva Garrido¹, Felipe Araya²

¹ Departamento de Obras Civiles, Universidad Técnica Federico Santa María, Santiago, Chile

² Departamento de Obras Civiles, Universidad Técnica Federico Santa María, Santiago, Chile

Resumen

La presente investigación desarrolla una metodología de optimización multiobjetivo, basada en algoritmos genéticos, para la planificación del mantenimiento de pavimentos aeroportuarios en Chile. Este trabajo surge ante la necesidad de mejorar las prácticas actuales de gestión, las cuales presentan un enfoque predominantemente reactivo y carecen de una integración sistemática de criterios técnicos y económicos en la toma de decisiones. En este contexto, la metodología propuesta busca apoyar la planificación estratégica mediante la generación de planes de mantenimiento de largo plazo que permitan equilibrar objetivos en conflicto, específicamente la minimización de costos del ciclo de vida y la maximización del desempeño del pavimento.

El enfoque se basa en la implementación del algoritmo NSGA-II (Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm II), el cual permite identificar soluciones óptimas de Pareto que representan distintos compromisos entre costo y efectividad. La metodología incorpora parámetros clave como modelos de deterioro, tratamientos de mantenimiento, umbrales de aplicación y costos económicos obtenidos a partir de fuentes reales. Se considera un horizonte de planificación de 20 años, lo que permite evaluar los efectos de las decisiones de mantenimiento en el largo plazo.

El caso de estudio se desarrolla en secciones del Aeródromo La Florida, donde se aplica el modelo propuesto y se comparan sus resultados con herramientas de gestión de pavimentos como PAVER y PaveAir. Adicionalmente, se integra un esquema de priorización que permite asignar intervenciones bajo restricciones presupuestarias anuales, facilitando la escalabilidad desde un enfoque a nivel de proyecto hacia uno a nivel de red.

Los resultados evidencian que la metodología propuesta permite generar estrategias de mantenimiento más eficientes en comparación con enfoques reactivos convencionales, logrando mejorar el desempeño del pavimento y reducir los costos acumulados. Asimismo, la integración de optimización y priorización constituye una herramienta práctica para organismos gestores, contribuyendo a una gestión más estratégica, preventiva y sostenible de la infraestructura aeroportuaria.

Palabras claves: Pavimentos aeroportuarios, planes de mantenimiento, optimización, algoritmos

1 Introducción

La infraestructura de transporte constituye uno de los pilares fundamentales para el desarrollo económico, social y territorial del país, ya que posibilita la movilidad de las personas, el acceso a oportunidades y la integración de mercados. Su adecuada planificación, conservación y gestión resultan esenciales para garantizar su funcionalidad frente a las demandas que generan las operaciones. Bajo este contexto, la gestión de infraestructura no solo implica la construcción de nuevas obras, sino también administrar de forma eficiente los activos existentes a lo largo de todo su ciclo de vida. Una gestión moderna debe orientarse a maximizar el valor social de la infraestructura mediante decisiones basadas en información técnica confiable, criterios de priorización objetiva y uso eficiente de los recursos disponibles, asegurando sostenibilidad y continuidad operativa en el tiempo (De Solminihaç T. et al., 2019). En este contexto, la administración técnica y económica del ciclo de vida de los activos se posiciona como un elemento central dentro de las políticas de gestión de infraestructura.

Dentro de la infraestructura de transporte, la infraestructura aeroportuaria cumple un rol fundamental en la conectividad nacional e internacional. En Chile, el crecimiento sostenido del tráfico aéreo desde la década de 1990 impulsó la expansión y modernización de los principales aeropuertos del país (Tolmo, 2020). La Dirección de Aeropuertos del Ministerio de Obras Públicas es el organismo encargado de regular, planificar y supervisar la red aeroportuaria nacional, garantizando estándares de seguridad, calidad y eficiencia operacional. Esta labor adquiere especial relevancia en la red primaria aeroportuaria la cual se compone de múltiples complejos estratégicos que requieren una gestión técnica especializada debido a las altas exigencias estructurales y operacionales.

Los pavimentos de pistas, calles de rodaje y plataformas constituyen uno de los activos más críticos dentro de un aeropuerto. Su desempeño influye directamente en la seguridad operacional y en la continuidad del servicio. La gestión de estos pavimentos se puede abordar mediante los Sistemas de Gestión de Pavimentos (SGP) y, en el caso aeroportuario, mediante Sistemas de Gestión de Pavimentos Aeroportuarios (SGPA). Estos sistemas integran información de condición, modelos de desempeño para predecir el estado de los pavimentos, costos y restricciones presupuestarias, permitiendo planificar intervenciones de forma preventiva a lo largo del ciclo de vida del pavimento (Chen & Zheng, 2021b; Shahin, 2005). Los SGPA son una herramienta útil para la planificación, la cual si se hace a partir de un mantenimiento preventivo permite reducir costos globales y evitar intervenciones mayores en etapas avanzadas de deterioros del pavimento (Camarena, 2018).

No obstante, a pesar del desarrollo de modelos de predicción del deterioro y de metodologías de evaluación de condición, la toma de decisiones en muchos sistemas de gestión de pavimentos aeroportuarios continúa basándose en enfoques simplificados o reactivos. Es frecuente que las intervenciones se ejecuten cuando el pavimento presenta niveles críticos de deterioro, lo que incrementa los costos de rehabilitación y reduce la eficiencia del uso de los recursos disponibles (De Solminihaç T. et al., 2019). Además, una parte importante de la literatura ha concentrado esfuerzos en el modelamiento del desempeño, dejando en segundo plano el desarrollo de

herramientas robustas de optimización para la priorización y programación de intervenciones (Chen & Zheng, 2021).

En el ámbito de la gestión de infraestructura vial y aeroportuaria, estudios han incorporado técnicas de optimización multiobjetivo para la planificación de mantenimiento de pavimentos, permitiendo equilibrar simultáneamente criterios de costo, condición y nivel de servicio (Chang, 2020; Torres Machí, 2015). Sin embargo, la aplicación sistemática de estos enfoques en pavimentos aeroportuarios es aún limitada, particularmente en el contexto latinoamericano. Por otro lado, la integración de algoritmos genéticos en esquemas de optimización multiobjetivo ha demostrado ser una herramienta eficaz para resolver problemas complejos de planificación a largo plazo bajo restricciones presupuestarias y múltiples criterios de evaluación (Ansarilari & Golroo, 2020).

En este contexto, la presente investigación propone el desarrollo de una metodología de optimización multiobjetivo, basada en algoritmos genéticos, para la planificación del mantenimiento de pavimentos aeroportuarios en Chile. El objetivo es contribuir a una transición desde esquemas reactivos hacia una gestión estratégica, preventiva y a largo plazo, incorporando criterios técnicos y económicos integrados que permitan mejorar la eficiencia, sostenibilidad y desempeño de la infraestructura aeroportuaria nacional.

2 Revisión de literatura

2.1 Estado de la practica

En Chile, el desarrollo de la infraestructura aeroportuaria está a cargo de la Dirección de Aeropuertos (DAP), organismo que depende del Ministerio de Obras Públicas (MOP). Dentro de las funciones de la DAP se encuentra la planificación, ejecución y supervisión de actividades de conservación, construcción y ampliación de la red aeroportuaria asegurando las condiciones adecuadas de calidad y eficiencia de las operaciones que necesita el sistema de transporte aéreo y los usuarios (DAP, 2025).

De forma paralela a las acciones de la DAP, la institución encargada de fiscalizar, regular y controlar los recintos aeroportuarios es la Dirección General de Aeronáutica Civil (DGAC). Este organismo, dependiente del Ministerio de Defensa Nacional, tiene como misión velar por la seguridad operacional, la navegación aérea y el cumplimiento de la normativa aeronáutica vigente en el país. En este contexto, la DGAC administra y opera una red de 102 recintos aeroportuarios de propiedad fiscal, garantizando la continuidad del servicio y el adecuado funcionamiento de las operaciones aéreas (DGAC, 2025).

La red aeroportuaria nacional se organiza en tres categorías, definidas según su nivel de tráfico, características operacionales y rol dentro del sistema de transporte aéreo (DAP, 2025):

- **Red Primaria:** conformada por 17 recintos (7 aeropuertos y 10 aeródromos), ubicados en 13 regiones. Al ser utilizados frecuentemente por las grandes aerolíneas para el transporte de pasajeros y carga, abarcan aproximadamente el 99,5% de los pasajeros registrados. De forma periódica la DAP interviene para realizar obras de conservación, mejoramiento o ampliar pistas, plataformas, calles de rodaje, márgenes de seguridad y cercos perimetrales. También se realizan trabajos de mantenimiento y ampliación de la infraestructura vertical

compuesta principalmente por terminales de pasajeros en aquellos recintos que no están concesionados. La figura 1 muestra los recintos que conforman esta red.

- **Red Secundaria:** Esta red es conformada por 12 aeródromos que registran operaciones de carga y pasajeros en aeronaves de menor tamaño que las utilizadas por las líneas aéreas de alto tráfico. Estos recintos realizan una labor esencial en permitir la conectividad aérea entre ciudades ubicadas en zonas que no están suficientemente cubiertas por la red primaria.
- **Pequeños Aeródromos:** Se trata de 279 recintos, de los cuales 101 son de uso público. Por lo general, cuentan con pistas de menor extensión y son usadas principalmente por pequeñas aeronaves. Su principal función es de carácter social, ya que tienen una gran importancia para conectar lugares aislados y posibilitar operaciones aéreas en casos de emergencias, catástrofes o control de incendios forestales



Figura 1. Aeropuertos y aeródromos de la Red Primaria. (Fuente: DAP, 2025)

La DAP actualmente aplica una metodología de conservación de pavimentos de carácter predominantemente reactivo, en la cual no se realiza una planificación de las actividades de mantenimiento de carácter preventivo, sino que las intervenciones responden principalmente a necesidades condicionadas por la disponibilidad presupuestaria (Tolmo, 2020). En este contexto, la selección de tratamientos se sustenta por la experiencia previa de la institución, sin considerar un análisis comparativo entre alternativas basado en criterios técnicos y económicos previamente definidos. En particular, no se evalúan de manera integrada los costos asociados a cada opción ni los beneficios potenciales derivados de su aplicación, lo que implica la ausencia de indicadores económico-técnicos que permitan relacionar ambos aspectos. Asimismo, tampoco se incorporan consideraciones ambientales dentro del proceso de toma de decisiones. En la práctica, una vez escogido el tratamiento según la experiencia, el análisis se limita a calcular costos asociados a materiales y ejecución, sin abordar la optimización del desempeño del pavimento a lo largo de su

ciclo de vida. En consecuencia, la problemática asociada a la selección del tratamiento óptimo para pavimentos aeroportuarios constituye un ámbito aún no desarrollado por la DAP, evidenciando la necesidad de implementar herramientas de apoyo a la decisión que permitan estructurar y optimizar este proceso (Tolmo, 2020). Además, actualmente la DAP se basa en experiencias anteriores para seleccionar los tratamientos a realizar sobre un pavimento, sin analizar diferentes alternativas en base a distintos criterios definidos. La problemática de seleccionar el tratamiento óptimo para un pavimento es un aspecto que la DAP no ha desarrollado, por lo que es necesario generar una herramienta para llevar a cabo este proceso (Salazar Joaquin, 2021).

2.2 Sistema de gestión de pavimentos Aeroportuarios

Un sistema de gestión de pavimentos (SGP) puede entenderse como una herramienta orientada principalmente a la conservación de los pavimentos para una red vial. En términos generales, su objetivo es diagnosticar y evaluar el estado de los pavimentos, para luego planificar y programar las intervenciones de mantenimiento a lo largo de su ciclo de vida, buscando siempre optimizar el uso de los recursos disponibles (Solminihac et al., 2018).

El equivalente de un SGP aplicado a la infraestructura aeroportuaria corresponde al sistema de gestión de pavimentos aeroportuarios (SGPA). Este se entiende como una herramienta de apoyo a la toma de decisiones que permite planificar y definir estrategias de mantenimiento técnica y económicamente sustentables, con el fin de conservar los pavimentos aeroportuarios en condiciones adecuadas de servicio, cumpliendo la normativa vigente y considerando un horizonte de análisis determinado (Di Mascio & Moretti, 2019).

A partir de lo mencionado anteriormente, los principales beneficios de un SGPA podrían ser (Di Mascio & Moretti, 2019):

- Fomentar la creación de una base de datos computarizada para organizar, almacenar y consultar información sobre los pavimentos.
- Constante monitoreo de los pavimentos junto con una evaluación sistemática y objetiva del nivel de deterioro.
- Predecir la evolución de deterioros e identificar cuando serán necesarias las intervenciones de mantenimiento y rehabilitación, la vida útil de dichas intervenciones, aquellas que presentan grandes degradaciones y la relación costo-beneficio de las obras.
- Seleccionar y optimizar la lista de trabajos de mantenimiento y rehabilitación a implementar en función de los recursos asignados.
- Identificar de forma sistemática las necesidades de intervención además de documentar con la finalidad de justificar solicitudes de asignaciones financieras.
- Permitir flexibilidad y adaptabilidad a cambios de recursos financieros y recursos humanos.

2.2.1 Niveles de gestión

Para sistemas de gestión de pavimentos de infraestructura vial y aeroportuaria existen dos niveles de gestión.

2.2.1.1 Nivel de proyecto

La gestión a nivel de proyecto se enfoca en un arco o segmento específico de la red, como por ejemplo un tramo de autopista o unidades muestrales de una sección de pista, y se caracteriza por un alto nivel de detalle sustentado en información proveniente del monitoreo continuo del pavimento. Este enfoque se aplica una vez que se han identificado las secciones prioritarias para intervención, permitiendo definir tratamientos de preservación específicos para cada tramo, incluyendo la selección de materiales, técnicas constructivas y procedimientos de ejecución, así como la construcción y el posterior seguimiento del desempeño del tratamiento implementado (De Solminihac T. et al., 2019; Jerry Hajek et al., 2011).

2.2.1.2 Nivel de Red

La gestión a nivel de red aborda el conjunto de la infraestructura vial o aeroportuaria dentro de un territorio determinado, permitiendo tomar decisiones que impactan la totalidad de los pavimentos. Este nivel se orienta principalmente a la planificación estratégica, la asignación presupuestaria y la definición de lineamientos de gestión, incorporando procesos de priorización de proyectos en función de la disponibilidad de recursos durante un periodo de análisis específico (De Solminihac T. et al., 2019; Jerry Hajek et al., 2011).

2.3 Funcionamiento SGPA

Un SGPA tiene una serie de procesos y componente. En primer lugar, se estructura a partir de una base de datos que concentra información relevante sobre la condición, uso y estrategias de mantenimiento de los pavimentos, la cual alimenta los procesos posteriores del sistema. Posteriormente, se realiza la evaluación del estado de los activos mediante indicadores técnicos que permiten caracterizar su condición actual, con estos datos, se proyecta su evolución a lo largo del ciclo de vida mediante modelos de desempeño calibrados para el contexto de estudio. Con base en estos resultados, el sistema identifica las necesidades de intervención según criterios estratégicos definidos por la administración, permitiendo optimizar tratamientos y priorizar proyectos. Finalmente, se efectúa la selección y programación de las intervenciones en función del presupuesto disponible, incorporando la ejecución de actividades y la retroalimentación del sistema, lo que deriva en un listado de proyectos priorizados (Tolmo, 2020). En la figura 2 se observa el diagrama de funcionamiento de un SGPA propuesto por Tolmo, 2020.

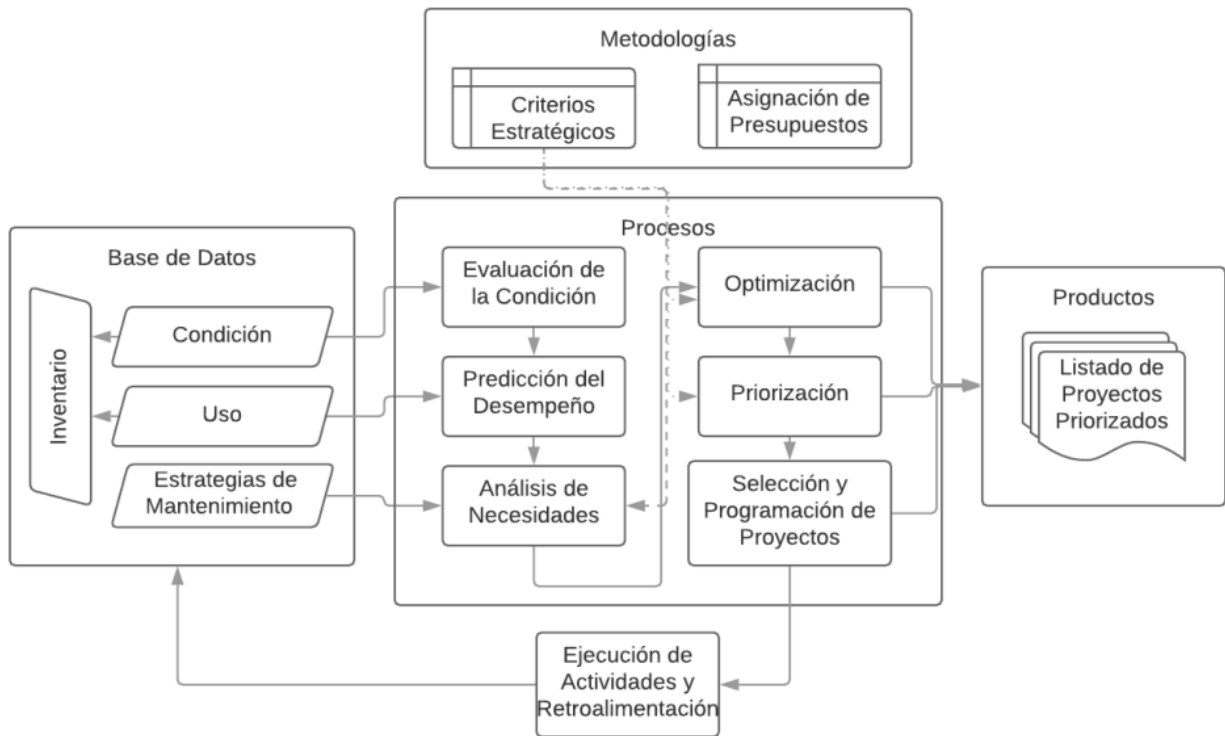


Figura 2. Funcionamiento de un SGPA. (Fuente: Tolmo, 2020)

2.3.1 Base de datos de un SGPA

La base de datos constituye un componente esencial dentro de un sistema de gestión de pavimentos aeroportuarios, ya que provee los datos de entrada necesarios para activar y sustentar los procesos de análisis y toma de decisiones del sistema, además de permitir el almacenamiento y organización de la información en distintas categorías según sus características (Tolmo, 2020).

Para estructurar y organizar adecuadamente la base de datos, la red aeroportuaria se fracciona en unidades, esto permite un control y análisis más detallado de áreas específicas (Chen et al., 2012). Estas fracciones son:

- **Red:** Corresponde al total de superficies pavimentadas que integran un recinto aeroportuario.
- **Rama:** Representa un subconjunto de la red asociado a una función operativa específica, como pistas, calles de rodaje o plataformas.
- **Sección característica:** subdivisión de las ramas y agrupa pavimentos con propiedades homogéneas (tipo de estructura, materiales, espesores o nivel de tránsito), constituyendo la unidad donde se planifican intervenciones de mantenimiento y rehabilitación.
- **Unidad de muestra:** Define la partición básica empleada para efectuar las evaluaciones e inspecciones del estado del pavimento.

Con respecto a la información almacenada en la base de datos, se incluyen los siguientes elementos (FAA, 2014).

- **Inventario:** Dimensiones, materiales constructivos, tipo de pavimento datos de intervenciones para reparar deterioros de todas las secciones de una red o recinto aeroportuario.
- **Composición estructural:** espesores de cada capa que compone el diseño estructural del pavimento.
- **Historial de mantenimiento y rehabilitación:** registro histórico de intervenciones tanto de mantenimiento como de rehabilitación.
- **Condición del pavimento:** datos de deterioros superficiales y daños estructurales
- **Transito:** información de operaciones y tipos de aeronaves.

2.3.2 Evaluación condición del pavimento

La evaluación de deterioros se realiza mediante inspecciones visuales del pavimento siguiendo una metodología definida, lo que permite determinar su condición a través de un indicador numérico objetivo. En pavimentos aeroportuarios, este proceso se basa generalmente en el índice PCI (Tolmo, 2020).

2.3.2.1 PCI

El Pavement Condition Index (PCI) es un indicador numérico compuesto que representa de manera sintética la condición superficial y funcional del pavimento aeroportuario, permitiendo evaluar su nivel global de deterioro a partir de inspecciones sistemáticas. Su determinación se basa en la identificación, cuantificación y clasificación de los distintos tipos de deterioros presentes en la superficie del pavimento, considerando tanto su severidad como la extensión afectada, lo que posteriormente se concluye en un valor único que refleja el estado general del pavimento (North Dakota Aeronautic Commission, 2024). Este valor adopta una escala que varía entre 0 y 100, donde 0 corresponde a un pavimento fallado o colapsado y 100 a un pavimento en condición excelente (ver figura 3).

Antes del cálculo del PCI, se realiza una evaluación en terreno mediante la inspección de cada unidad muestral seleccionada. Durante esta etapa, se elabora un diagrama de la unidad en una hoja de registro, donde se identifican y resumen los distintos deterioros observados junto con su nivel de severidad. En este contexto, la norma ASTM D5340 establece la clasificación de los tipos de deterioro aplicables tanto a pavimentos flexibles como a pavimentos rígidos. En el Anexo A y Anexo B se encuentran las hojas de registro en conjunto con el listado de deterioros utilizadas por la DAP las cuales siguen la norma ASTM D5340.

CALIFICACIÓN PCI	
86 - 100	BUENO
71 - 85	SATISFACTORIO
56 - 70	ACEPTABLE
41 - 55	POBRE
26 - 40	MUY POBRE
11 - 25	SERIO
0 - 10	COLAPSADO

Figura 3. Calificación PCI. (Fuente: ASTM D5340)

2.3.3 Modelos de desempeño

Los modelos de desempeño de pavimentos corresponden a formulaciones matemáticas que permiten proyectar el estado del pavimento a lo largo del tiempo, considerando tanto sus condiciones iniciales al momento de puesta en servicio como las que presenta durante su vida útil. Estas herramientas posibilitan estimar los efectos de las intervenciones de mantenimiento en horizontes de corto y largo plazo, facilitando la identificación de los momentos oportunos para ejecutar acciones de conservación, así como la estimación del nivel de deterioro esperado y su progresión temporal (Solminihaç et al., 2018).

Con respecto a los tipos de modelos de desempeño existen distintas formas de clasificarlos como por ejemplo el enfoque que estos tengan (Pérez, 2023). En la Tabla 1 se resumen las características de los distintos tipos de modelo.

Tabla 1. Tipos de modelo de desempeño (Fuente: Pérez, 2023)

Tipo de modelo de desempeño	Descripción
Regresivos (deterministas/continuos)	Estiman la condición con funciones matemáticas que relacionan un indicador de deterioro con variables explicativas (p. ej., tránsito, clima, estructura) usando datos históricos; pueden ser regresión lineal o múltiple; se aplican a deterioros específicos (agrietamiento, fatiga, ahuellamiento) e índices como serviciabilidad, rugosidad y condición estructural.
Probabilísticos (Markov / métodos de Monte Carlo con cadenas de Markov)	Proyectan el estado futuro mediante probabilidades a partir del estado actual (cadenas de Markov); son útiles cuando no existe base de datos de largo plazo; los métodos de Monte Carlo con cadenas de Markov. se usan para aproximaciones bayesianas y estimación de parámetros de modelos deterministas bajo incertidumbre.
Inteligencia artificial	Usan algoritmos para aprender patrones desde datos y predecir condición sin definir una forma funcional explícita; abordan problemas de clasificación (categorías) y regresión (valores continuos); en pavimentos se usan frecuentemente modelos como Random Forest y redes neuronales, destacando también el Deep Learning por su capacidad de análisis.

2.3.4 Métodos de planificación de mantenimiento

Dentro de la gestión de pavimentos, la planificación de las intervenciones puede abordarse desde distintos horizontes temporales, dependiendo de los objetivos de conservación, el nivel de decisión y la disponibilidad de información. En este contexto, es posible distinguir entre una planificación de corto plazo la cual se enfoca en las necesidades inmediatas de mantenimiento, Por otra parte, una planificación de largo plazo, orientada a la proyección estratégica de intervenciones y recursos.

- **Planificación de mantenimiento de corto plazo o anual:** se orienta principalmente a la programación de intervenciones en un horizonte anual, a partir de la condición actual del pavimento y de los deterioros identificados en la inspección. En este enfoque, la toma de decisiones se centra en determinar qué acciones de mantenimiento y reparación deben ejecutarse en el período inmediato sobre cada sección, considerando su estado presente y la severidad de los daños observados (Shahin, 2005). De esta manera, la planificación de corto plazo cumple una función operativa, ya que permite asignar tratamientos concretos para atender las necesidades más inmediatas de conservación de la red.
- **Planificación de largo plazo o multianual:** orientada a proyectar necesidades futuras de mantenimiento mayor, analizar restricciones presupuestarias y apoyar la toma de decisiones estratégicas a nivel de red. Hay distintos métodos para ello, como la planificación basada en PCI mínimo, el método de PCI crítico y la programación dinámica, todos enfocados en

estimar requerimientos de intervención a lo largo de varios años, mantener cierto nivel de condición, alcanzar metas de desempeño en un horizonte definido o evitar llegar a la rehabilitación (Shahin, 2005). De este modo, la planificación de largo plazo no solo selecciona tratamientos, sino que también vincula el desempeño futuro del pavimento con objetivos de gestión y disponibilidad de recursos.

2.3.4.1 Estándares de mantenimiento

Los estándares de mantenimiento de pavimentos pueden entenderse como el marco que traduce las políticas y estrategias de conservación en criterios concretos de intervención. En este sentido, las estrategias corresponden al conjunto de acciones de mantenimiento, conservación o rehabilitación que se aplican a lo largo de la vida útil del pavimento para preservar o recuperar su condición funcional y estructural, mientras que las políticas de mantenimiento definen los principios bajo los cuales dichas acciones se ejecutan, ya sea en función del momento más conveniente para intervenir o de los umbrales de condición que gatillan una determinada actuación. Desde la perspectiva de la gestión de pavimentos, estos estándares no solo buscan mantener un nivel de servicio mínimo o aceptable, sino también orientar una planificación sistemática que permita identificar necesidades de intervención, priorizar proyectos y optimizar el uso de los recursos disponibles, evitando que el deterioro avance hasta niveles en que la rehabilitación resulte mucho más costosa (De Solminihaç et al., 2018; Shahin, 2005), esto se visualiza en la figura 4 en donde en el inicio de la curva los costos de mantenimiento son menores a comparación del costo de rehabilitación y reconstrucción en etapas más avanzadas del ciclo de vida del pavimento.

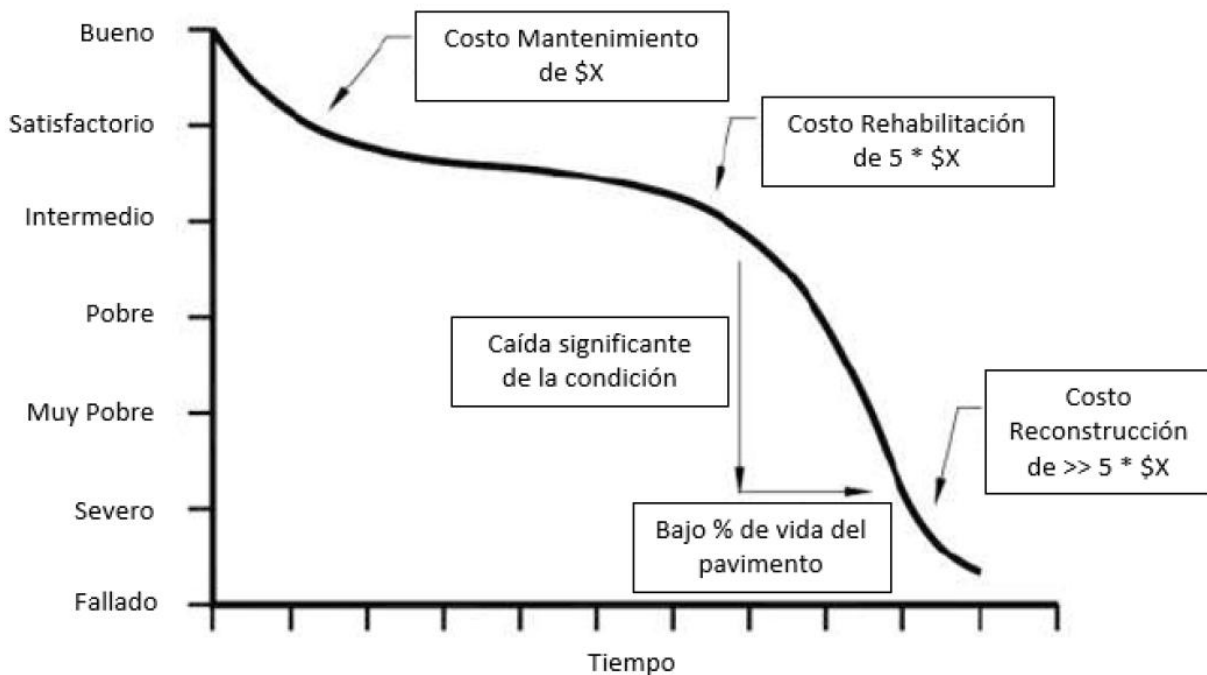


Figura 4. Tipo de mantenimiento según condición del pavimento en el tiempo. (Fuente: (Salazar Joaquin, 2021))

2.3.4.2 Optimización y priorización

La optimización corresponde a uno de los procesos finales del sistema de gestión de pavimentos, en el cual se toma la decisión de cuál tratamiento de conservación aplicar a un determinado pavimento, bajo criterios previamente definidos y plasmados en una función objetivo (Tolmo, 2020).

La priorización consiste en ordenar proyectos o acciones según criterios definidos previamente, estableciendo un orden de preferencia para su ejecución. Sin embargo, este orden no garantiza por sí solo que la selección resultante sea la más conveniente, por lo que suele complementarse con procesos de optimización que permitan elegir el conjunto de alternativas más adecuado bajo ciertas restricciones (De Solminihaç T. et al., 2019).

2.4 Softwares de Gestión de Pavimentos

2.4.1 PaveAir

La aplicación web PaveAir fue desarrollada por la Administración Federal de Aviación (FAA) para apoyar a las organizaciones encargadas de la gestión de pavimentos aeroportuarios en la toma de decisiones. En términos generales, esta herramienta cuenta con una serie de funciones que le permiten evaluar, planificar y programar distintas alternativas de tratamientos de conservación para los pavimentos aeroportuarios (FAA, 2020).

En cuanto a su estructura, PaveAir presenta componentes de inventario, trabajos, PCI, predicción de desempeño, análisis de condición, planificación de mantenimiento y rehabilitación (M&R), reportes y GIS (Tolmo, 2020).

2.4.2 PAVER

Desarrollado originalmente por el U.S. Army Corps of Engineers para apoyar la administración de redes de pavimentos, especialmente en aeródromos, caminos y estacionamientos, mediante el registro del inventario, la evaluación de la condición superficial a través del Pavement Condition Index (PCI), la proyección del desempeño y la planificación de actividades de mantenimiento y rehabilitación, su propósito principal es servir como una herramienta de apoyo a la toma de decisiones (U.S. Army Corps of Engineers, 2016).

2.5 Optimización en gestión de pavimentos

La optimización corresponde a un proceso de apoyo a la toma de decisiones que busca identificar la mejor solución posible entre un conjunto de alternativas factibles, de acuerdo con uno o más objetivos previamente definidos y sujeto a determinadas restricciones. En el ámbito de la infraestructura, su aplicación permite seleccionar estrategias de intervención más convenientes desde el punto de vista técnico, económico y operacional. En particular, en la gestión de pavimentos, la optimización se utiliza para definir combinaciones de tratamientos y momentos de intervención que permitan maximizar el desempeño de la red y, al mismo tiempo, hacer un uso eficiente de los recursos disponibles.

Dentro de la optimización aplicada a la gestión de pavimentos, es posible distinguir distintos enfoques de resolución, entre los que destacan el enfoque secuencial y el enfoque holístico (Torres-Machí et al., 2014).

- Enfoque secuencial: primero se determina el tratamiento óptimo para cada activo o sección, y después se decide cuáles intervenir o priorizar con el presupuesto disponible. Es más simple de entender y aplicar, pero puede perder de vista el efecto global sobre toda la red.
- Enfoque holístico: el problema se resuelve de forma conjunta, es decir, al mismo tiempo se decide qué tratamiento aplicar y a qué activos conviene asignarlo. Esto representa mejor la red como un todo, pero aumenta bastante la complejidad computacional.

2.5.1 Métodos de optimización

Independiente del enfoque de optimización, existe una amplia variedad de métodos de optimización, cuya aplicación depende del tipo de datos utilizados, de las funciones objetivo, de las restricciones del problema, de los tiempos de análisis, entre otros factores. Los principales métodos de optimización empleados en gestión de infraestructura se presentan en la Tabla 2.

Tabla 2. Métodos de optimización (De Solminihac T. et al., 2019)

Métodos	
Prioridad basada en prelación	<ul style="list-style-type: none"> • Análisis Condición pavimento • Análisis económico
Métodos programación matemática	<ul style="list-style-type: none"> • Programación lineal y no lineal • Programación entera • Programación dinámica
Métodos de aproximación o heurísticos	<ul style="list-style-type: none"> • Heurísticas búsqueda secuencial por entorno • Algoritmos genéticos
Otros métodos	<ul style="list-style-type: none"> • Árboles de decisión • Machine learning y Deep learning • Redes Neuronales

2.5.1.1 Métodos manuales y de prioridad basada en prelación

Estos métodos se basan en ordenar las distintas alternativas de mantenimiento y, a partir de un indicador previamente definido, seleccionar las acciones de conservación que se aplicarán. Su principal ventaja es que son fáciles de implementar y, además, resultan apropiados cuando el número de alternativas de mantenimiento es reducido (Torres-Machí et al., 2015).

Estos también se pueden acompañar de una optimización manual la cual consiste en elaborar un plan de mantenimiento a partir de la observación directa del comportamiento de la curva de deterioro, con el fin de identificar el momento más adecuado para intervenir. La selección del tratamiento depende de los resultados de la auscultación realizada al pavimento, especialmente del valor del PCI y de su evolución en el tiempo representada en la curva de deterioro. En general, este tipo de optimización suele ser más conservadora que otros métodos de optimización, ya que el momento de intervención queda condicionado por el PCI crítico previamente definido.

2.5.1.2 Métodos programación matemática

Los métodos de optimización basados en programación matemática corresponden a procedimientos formales orientados a encontrar la mejor solución posible bajo un conjunto dado de condiciones, mediante la minimización o maximización de una función objetivo definida sobre un conjunto factible. En este marco, la programación matemática, entendida como parte del campo de la optimización, proporciona la base teórica para formular y resolver problemas de decisión en los que la solución debe satisfacer restricciones de distinta naturaleza, tales como limitaciones técnicas, operacionales o económicas (Giorgi et al., 2023).

Estos pueden clasificarse según la estructura del modelo formulado. Cuando la función objetivo y las restricciones son lineales, se trata de programación lineal; si algunas variables deben tomar valores enteros o binarios, corresponde a programación entera o programación mixta; y cuando la función objetivo o las restricciones presentan relaciones no lineales, se habla de programación no lineal. En este sentido, la elección del método de resolución depende directamente de las características matemáticas del problema y del tipo de variables involucradas (NEOS Guide, n.d.)

Este tipo de métodos puede requerir un alto esfuerzo computacional, especialmente cuando el problema de optimización presenta un gran número de variables de decisión, múltiples restricciones y relaciones no lineales entre sus componentes (Torres Machí, 2015). A medida que aumenta el tamaño y la complejidad del problema, también crece el número de combinaciones posibles que deben evaluarse para encontrar una solución óptima, lo que incrementa significativamente los tiempos de cálculo y las exigencias de memoria. Esta situación se vuelve aún más crítica en problemas reales de infraestructura, donde suelen incorporarse horizontes de planificación extensos, restricciones presupuestarias, incertidumbre en los datos y múltiples objetivos de decisión.

2.5.1.3 Métodos de aproximación o heurísticos

Los métodos de optimización aproximada o heurísticos corresponden a enfoques de búsqueda que, en lugar de garantizar la obtención de la solución global óptima, buscan encontrar soluciones de alta calidad en tiempos de cómputo razonables. Su lógica se basa en explorar el espacio de soluciones mediante reglas, estrategias de búsqueda y criterios de mejora que permiten acercarse a resultados cercanos al óptimo, especialmente en problemas de alta complejidad. En este contexto, las heurísticas constituyen una familia más general de métodos heurísticos, capaces de adaptarse a distintos tipos de problemas y de combinar procedimientos de búsqueda local con estrategias de exploración más amplias para evitar quedar atrapadas en óptimos locales. Entre sus principales ventajas destacan su flexibilidad, su facilidad de implementación y su capacidad para abordar problemas grandes y complejos que resultan difíciles de resolver mediante métodos exactos (Torres Machí, 2015).

Este tipo de optimización resulta especialmente útil en problemas de gestión de infraestructura, donde existen numerosas variables de decisión, restricciones presupuestarias, horizontes de análisis extensos y múltiples combinaciones posibles de intervención (Torres-Machí et al., 2014). Por ello, son ampliamente utilizados en problemas de combinatoria y de planificación, como la programación de actividades de mantenimiento, la selección de tratamientos y la asignación de recursos en redes de pavimentos. Así, más que reemplazar el óptimo exacto, estos métodos ofrecen una alternativa eficiente y robusta para apoyar la toma de decisiones en contextos reales de alta complejidad.

El enfoque es similar al de la programación matemática; se definen funciones objetivas, restricciones, evaluaciones, etc. Sin embargo, el proceso de búsqueda, en vez de evaluar todas las soluciones parte de una población inicial que se van modificando iterativamente hasta llegar a soluciones cercanas al más óptimo (Vásquez & García, 2021). En la Figura 5 se observa el marco conceptual de una herramienta de optimización heurística para obtener un programa de mantenimiento de una red vial urbana.

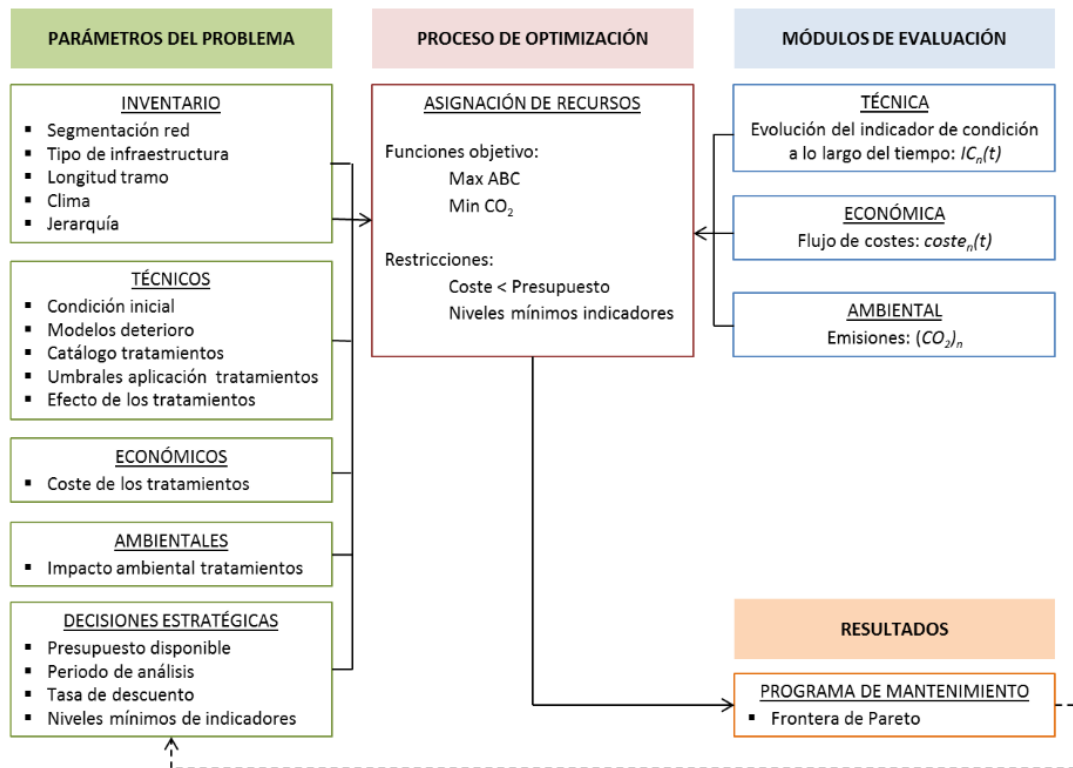


Figura 5. Marco Conceptual de herramienta de optimización heurística aplicada a una red urbana. (Fuente:Torres Machí, 2015)

2.6 Optimización multiobjetivo

La optimización multiobjetivo ha adquirido creciente relevancia en la gestión de pavimentos, debido a que las decisiones de mantenimiento y rehabilitación no dependen de un solo criterio, sino de la necesidad de equilibrar simultáneamente objetivos en conflicto, como la minimización de costos, la maximización de la condición del pavimento y, más recientemente, la reducción de impactos ambientales y de costos para los usuarios. En este contexto, Chen et al. señalan que los problemas de conservación de pavimentos son, en esencia, problemas multiobjetivo, y destacan que este enfoque se ha consolidado como una línea de desarrollo clave dentro de los sistemas de gestión de pavimentos (Chen & Zheng, 2021a).

Entre los trabajos pioneros, destaca el de (Fwa et al., 2000), quienes desarrollaron un procedimiento basado en algoritmos genéticos para resolver la programación multiobjetivo de mantenimiento de pavimentos a nivel de red, constituyendo una de las referencias clásicas en la aplicación de este

tipo de técnicas al ámbito de pavimentos. Posteriormente, (Elhadidy et al., 2015) plantearon un modelo de optimización multiobjetivo para redes viales que buscó minimizar los costos de intervención y maximizar la condición de la red, utilizando cadenas de Markov para modelar el deterioro y algoritmos genéticos para obtener soluciones de Pareto.

Más adelante, la literatura avanzó hacia enfoques de mayor alcance, incorporando dimensiones de sostenibilidad. En esta línea, (Santos et al., 2017) desarrollaron un sistema de apoyo a la decisión basado en optimización multiobjetivo para la gestión de pavimentos, integrando en forma conjunta costos de agencia, costos de usuario e impactos ambientales a lo largo del ciclo de vida. Esta evolución demuestra que la optimización multiobjetivo no solo permite encontrar soluciones técnicamente eficientes, sino también apoyar decisiones más integrales y consistentes con criterios económicos, operacionales y ambientales.

En el caso específico de los pavimentos aeroportuarios, también se han registrado aplicaciones relevantes. Ansarilari y Golroo (2020) propusieron un enfoque híbrido que combina cadenas de Markov para generar modelos de desempeño y generar planes de mantenimiento con algoritmos genéticos multiobjetivo supervisados para la gestión integrada de pavimentos aeroportuarios, mientras que en Corea del Sur se desarrolló un sistema de toma de decisiones para mantenimiento aeroportuario orientado a la optimización de casos de condición y restricciones presupuestarias (Roh et al., 2023). Estos antecedentes muestran que la optimización multiobjetivo constituye una herramienta pertinente para enfrentar la complejidad de la planificación de mantenimiento en redes aeroportuarias, donde deben compatibilizarse exigencias técnicas, económicas y operacionales.

Existen dos maneras de resolver un problema de optimización multiobjetivo: resolverlo de manera multiobjetivo o convertirlo a un problema de un objetivo. La primera opción tiene algunos beneficios sobre la segunda. Aunque el transformar el problema a un solo objetivo lo simplifica, la selección de funciones auxiliares para convertir el problema requiere de un conocimiento extenso. Además, algunas metodologías utilizadas en los problemas multiobjetivo, como lo es la frontera de Pareto, otorgan una selección de soluciones de las cuales se puede escoger la más apropiada dependiendo de los recursos y restricciones existentes, no así un problema de un solo objetivo, el cual solo provee una solución única (Ansarilari & Golroo, 2019).

De forma genérica, un problema multiobjetivo se puede representar de la siguiente manera. (Deb, 2011):

$$\text{Maximizar/Minimizar } f_m(x) ; m = 1, 2, \dots, M$$

Sujeto a:

$$g_j(x) \geq 0 ; j = 1, 2, \dots, J$$

$$h_p(x) = 0 ; p = 1, 2, \dots, P$$

$$x_i^{(L)} \leq x_i \leq x_i^{(U)} ; i = 1, 2, \dots, n$$

Una solución $x \in R^n$ es un vector de n variables de decisión: $x=(x^1, x^2, \dots, x^n)^T$. Las soluciones que satisfacen las restricciones y los límites de las variables constituyen el espacio de soluciones factibles $S \subset R^n$. Como los objetivos en las optimizaciones multiobjetivo tienden a estar en conflicto,

la probabilidad de que exista una solución óptima para todos los objetivos considerados es baja. Por este motivo, se considera el concepto de óptimo de Pareto, que es utilizado para estudiar las soluciones no dominadas. Estas soluciones son las que, al menos una de sus funciones objetivo, es superior a todas las otras opciones disponibles (Ansarilari & Golroo, 2019).

El conjunto de óptimos de Pareto se denomina frontera de Pareto. Para poder visualizar este concepto, en la Figura 6 se puede observar la frontera de Pareto que resulta de un conjunto de varias soluciones posibles para un problema de optimización que busca minimizar ambos objetivos (f_1 y f_2). De este ejemplo se puede concluir que la solución definida en el punto “1” es un óptimo de Pareto ya que no existe otra solución que disminuya el valor de f_2 sin aumentar el de f_1 . Esta condición se cumple para las soluciones “2” y “3”. El resto de los puntos (“4”, “5” y “6”) son dominados por la solución “2” (Torres Machí, 2015).

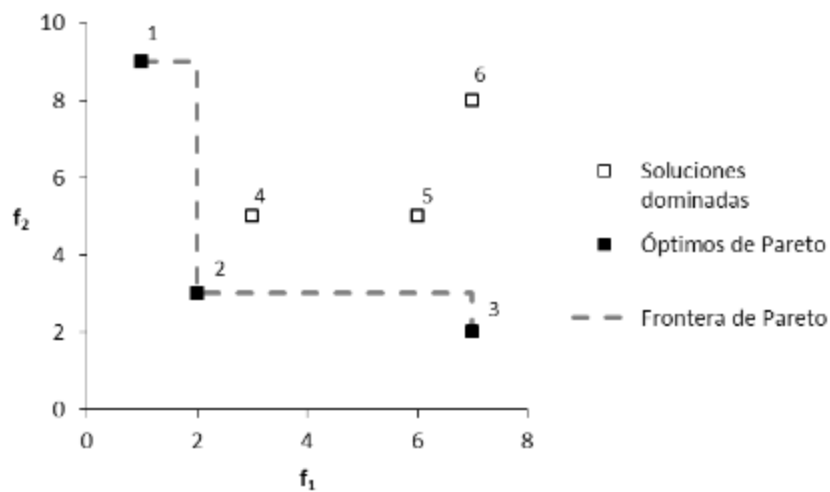


Figura 6. Representación de la frontera de Pareto.

Fuente: (Torres Machí, 2015)

2.6.1 Algoritmo evolutivo multiobjetivo

Idealmente, un plan de mantenimiento de pavimento aeroportuario busca mantener el pavimento con un buen nivel de servicio, utilizando un presupuesto limitado, y evitando causar un impacto social y ambiental muy alto. Lamentablemente, estos requisitos tienden a ser contradictorios. Por ejemplo, el mantener los pavimentos en un nivel de servicio muy alto tiende a mantener los costos económicos altos, y un plan de mantenimiento con muchas intervenciones mantendría la pista cerrada, siendo un inconveniente para las comunidades que utilizan estos aeropuertos. Para facilitar la toma de decisiones en los planes de mantenimiento, se desarrollan metodologías multiobjetivo basadas en algoritmos genéticos para poder generar e identificar mejores soluciones que puedan satisfacer todas las necesidades (Fwa et al., 2000).

Los algoritmos genéticos se fundamentan en los principios de la evolución. En este sentido, presentan diferencias relevantes respecto de las metodologías clásicas de optimización. Una de las principales es que, en lugar de trabajar con una única solución en cada iteración, operan con una

población de soluciones potenciales. Esto les permite explorar simultáneamente distintas alternativas dentro del espacio de búsqueda y evaluar múltiples posibilidades de manera paralela. Además, generan nuevas soluciones a partir de la población inicial mediante reglas de transición probabilísticas. Otra diferencia importante es que comparan estas soluciones en función de la función objetivo, sin depender de información de gradiente. Por esta razón, constituyen un enfoque más directo y versátil, ya que no requieren condiciones como diferenciabilidad, convexidad ni el uso de funciones auxiliares para su aplicación (Fwa et al., 2000).

2.6.2 NSGA II

La segunda versión del algoritmo genético no dominado, o en inglés, Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm (NSGA-II), es uno de los algoritmos genéticos más populares para encontrar múltiples soluciones para el óptimo de Pareto en un problema de optimización multiobjetivo y se caracteriza por lo siguiente:

- Utiliza un principio elitista
- Utiliza un mecanismo explícito para preservar la diversidad
- Enfatiza soluciones no dominadas

En la figura 7 se representa el procedimiento de este algoritmo en donde para cualquier generación t , la población descendiente (Q_t) se crea primero utilizando la población de padres (P_t) y los operadores genéticos habituales (mutaciones, cruces, entre otros). Ambas poblaciones forman una nueva población, R_t , la cual tiene un tamaño $2N$. Luego, la población R_t se clasifica en diferentes clases de no dominación. A continuación, la nueva población es rellenada por puntos de frentes de no dominación, uno a la vez. El rellenado comienza con el primer frente de no dominación (de clase uno) y continúa con los puntos del segundo frente de no dominación, y así sucesivamente. Como el tamaño de R_t es $2N$, no todos los frentes pueden ser acomodados en los N espacios disponibles para la nueva población, por lo que los frentes no acomodados serán eliminados. Se puede observar este escenario en la siguiente figura. En lugar de descartar arbitrariamente algunos miembros del último frente, los puntos que harán que la diversidad de puntos sea más alta serán seleccionados (Deb, 2011).

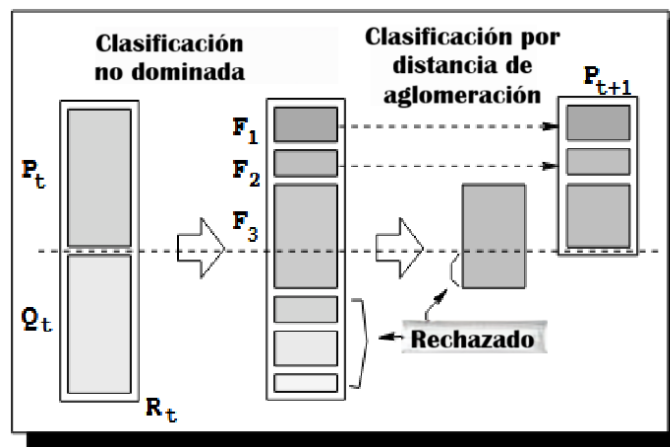


Figura 7. Esquema del procedimiento NSGA-II.

Fuente: Adaptado de (Deb, 2011)

La disposición según distancia de aglomeración de los puntos del último frente que no pudo ser completamente acomodado se realiza en orden descendente de sus valores de distancia de aglomeración, y se escogen los puntos desde la parte superior de la lista ordenada. La distancia de aglomeración d_i , del punto i es una medida del espacio objetivo alrededor i que no es ocupado por ninguna otra solución en la población. Aquí, simplemente se calcula d_i estimando el perímetro del cuboide formado utilizando los vecinos más cercanos del espacio objetivo como los vértices, a esto se le llama distancia de aglomeramiento, y se puede observar en la figura 8.

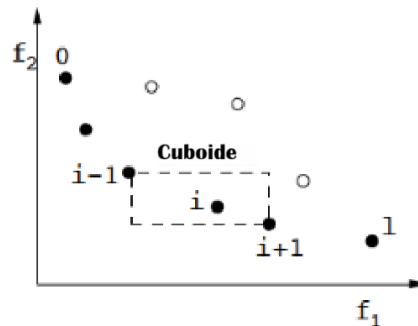


Figura 8. Cálculo de la distancia de aglomeramiento.

Fuente: Adaptado de (Deb, 2011)

Cuando se ejecuta este algoritmo, los operadores de NSGA-II provocan que la población se vaya acercando al frente óptimo de Pareto a medida que avanzan las generaciones. En la figura 9 se muestra la evolución para la generación inicial, 10, 30 y 100, respectivamente. En la generación 100, la población está muy cercana al verdadero frente de Pareto óptimo (Deb, 2011).

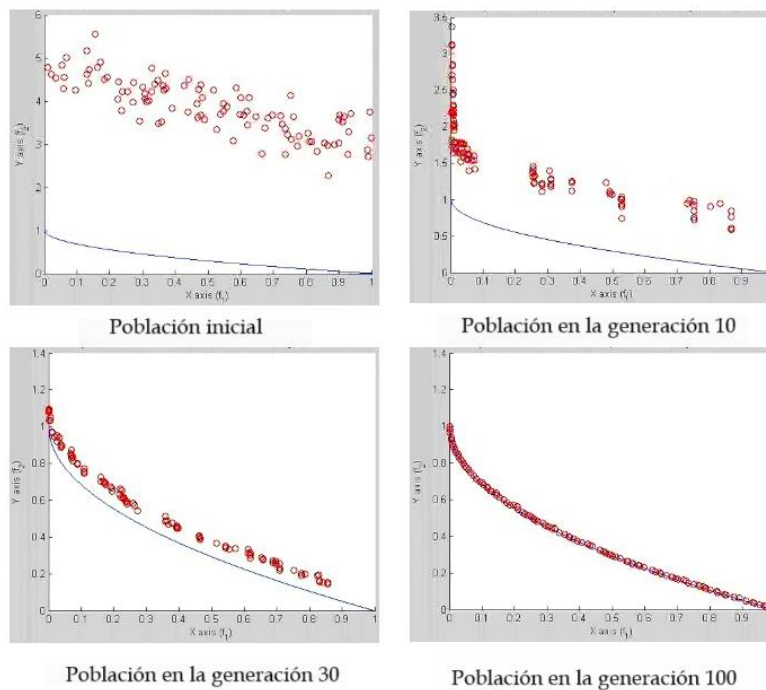


Figura 9. Evolución de la población según generación.

Fuente: Adaptado de (Deb, 2011).

En resumen, los procesos para aplicar correctamente el algoritmo es el siguiente:

1. **Inicialización:** Generación aleatoria de una población de planes de mantenimiento. Esto es solo para dar marcha al proceso, con cada iteración el programa de intervenciones se va depurando hasta alcanzar la solución óptima de acuerdo con los objetivos planteados y las restricciones impuestas.
2. **Evaluación:** Cálculo de las funciones objetivos, es decir, Área Bajo la Curva y Costo Total junto con la verificación de las restricciones planteadas.
3. **Clasificación por dominancia:** Ordenamiento de soluciones plausibles según el concepto de no dominancia (Frentes de Pareto).
4. **Cálculo de Distancia de Hacinamiento (Crowding Distance):** Este paso permite preservar la diversidad entre soluciones.
5. **Selección, Cruce y Mutación:** La selección se realiza por torneo binario. Con esto se hace referencia a que gana la solución que pertenece a un Frente de Pareto (rango de dominancia) inferior (mejor) o, en caso de que ambas soluciones pertenezcan al mismo frente, se selecciona aquella que posea una mayor “Distancia de Hacinamiento”. De esta forma, se asegura la elección de una solución que esté más aislada o que contribuya a una mayor diversidad del frente. Posterior a esto, se realiza el cruce de cromosomas para combinar los planes de mantenimiento y, finalmente, la mutación aleatoria de genes para explorar nuevas soluciones.
6. **Elitismo:** Retención de las mejores soluciones (no dominadas) en cada generación.
7. **Criterio de Parada:** Número máximo de generaciones o convergencia del frente de Pareto.

Los resultados al aplicar el algoritmo son:

- Frente de Pareto: Conjunto de soluciones no dominadas que representan la mejor compensación (trade-off) entre alta eficiencia de la solución
- Selección según necesidades: Lo anterior permite seleccionar soluciones de acuerdo con criterios de Mínimo Costo (LC), Máximo Desempeño (HP) o una solución óptima que combine ambos criterios (BO: Best Option).

2.7 Actividades de Mantenimiento y Rehabilitación (M&R)

Hay una serie de procesos o tipologías de proyectos que se desarrollan en la red aeroportuaria. Según la metodología de formulación y evaluación de proyectos de infraestructura aeroportuaria de la DAP se definen los siguientes:

- Normalización: Corresponde a todas aquellas iniciativas de inversión necesarias para dar cumplimiento a la normativa aeronáutica vigente, referida a la infraestructura del área de movimiento, exigida por la autoridad aeronáutica para certificar los aeropuertos y aeródromos del país, conforme a los compromisos contraídos por el Estado de Chile con la Organización de Aviación Civil Internacional (OACI), para satisfacer los requerimientos de operación de las aeronaves de diseño del aeródromo/aeropuerto, que realizan vuelos regulares en los aeropuertos y aeródromos del territorio nacional. Estas iniciativas serán independientes de los requerimientos de demanda, como, por ejemplo: número de vuelos y operación con peso máximo de despegue de la aeronave crítica. Asimismo, también se considerarán aquellas iniciativas de inversión referidas al cumplimiento de otras normativas nacionales de otros ámbitos, tales como sistemas de detección de incendios, facilidades para personas con movilidad reducida, sanitarias, ambientales etc. Cuando exista un cambio de material de vuelo que ocasione nuevos requerimientos normativos, se entenderá como ampliación o mejoramiento.
- Ampliación: Corresponde a todos aquellos proyectos que amplíen infraestructura existente y que como resultado de su materialización brindarán una mayor capacidad o nivel de servicio, asociada a los pasajeros, operaciones, mantenimiento de aeronaves o carga, ya sea del área de movimiento (airside) o de la zona pública (landside). Por ejemplo, ampliación (largo, ancho o metros cuadrados totales) de una pista de aterrizaje y despegue, rodajes o plataforma, edificio terminal de pasajeros que permitirán atender más pasajeros en un lapso manteniendo un nivel de servicio predefinido.
- Conservación: Corresponde a labores de mantenimiento de las obras o instalaciones verticales u horizontales tendientes a mantener los estándares que corresponden a un funcionamiento predeterminado. La conservación puede ser de carácter rutinario, es decir con una periodicidad que generalmente es anual o bianual, con intervenciones asociadas al sellado de juntas, mantenimiento de cercos y caminos interiores, cubiertas, pintura, demarcaciones, etc.; o de carácter mayor, generalmente con una periodicidad sobre los 5 años dependiendo de la materialidad, uso y ubicación de la infraestructura, como es el caso del mantenimiento de la carpeta de rodadura en el área de movimiento.

- **Reposición:** Corresponde a labores que implican la renovación total o parcial de un servicio ya existente, con o sin cambio de capacidad y/o calidad de este. Es decir, para reemplazar o modernizar elementos que han llegado al término de su vida útil, que por avances tecnológicos han quedado obsoletos o presentan deficiencias de tipo estructural. Corresponderá por ejemplo al cambio de emplazamiento de un aeropuerto o aeródromo existente, o a la renovación de una edificación o infraestructura puntual del aeropuerto o aeródromo.
- **Mejoramiento:** Corresponde a proyectos que mejoran las características de determinados elementos de infraestructura sin por ello aumentar la capacidad operacional de la misma. Por ejemplo, proyectos asociados a mejoras de condiciones de sustentabilidad para incorporar sistemas más eficientes (calentamiento de agua mediante placas solares), mejora de calidad de servicio de ciertas instalaciones en aspectos relacionados con circulación de personas o medios de transporte (nuevos medios mecánicos de traslado), sanitarios, lumínicos, acústicos, contaminación, de áreas de proceso asociadas al pasajero, áreas de servicio para los acompañantes.
- **Construcción:** Corresponde a proyectos integrales para desarrollar un nuevo aeródromo/aeropuerto, u obras nuevas dentro de aeropuertos existentes, con o sin cambio de la capacidad de los mismos. Puede referirse a un nuevo aeropuerto o aeródromo para permitir incorporar el modo aéreo en un lugar que no dispone de facilidades de acceso terrestre y en el caso de nueva infraestructura en un aeropuerto existente, corresponderá por ejemplo a un nuevo rodaje, nueva pista, o cualquier otra infraestructura que antes no existía.

Dependiendo del tipo de pavimento, valor PCI, tipo y grado de deterioros hay una variedad de trabajos de mantenimiento y conservación los cuales se pueden clasificar en:

- **Mantenimiento localizado preventiva:** Se entiende por mantenimiento preventivo el conjunto de actividades destinadas a reparar los deterioros existentes, independientemente de su ubicación, con el objetivo principal de frenar la tasa de deterioro del Índice de Condición del Pavimento (PCI). Este tipo de intervención se aplica a todos los pavimentos del aeropuerto cuya condición se encuentra por sobre el PCI crítico, es decir, $PCI \geq 65$ en el área de movimiento de aeronaves. (FAIC, 2021).
- **Mantenimiento global preventivo:** Este tipo de mantenimiento se aplica sobre sectores completos del pavimento y tiene como objetivo principal retardar la tasa de deterioro de su condición. Dentro de esta categoría se incluyen los tratamientos superficiales en pavimentos asfálticos y el sello de juntas en pavimentos rígidos. Su aplicación corresponde a pavimentos cuya condición se mantiene por sobre el PCI crítico, es decir, $PCI \geq 65$ en pavimentos aeroportuarios (FAIC, 2021).
- **conservación mayor:** Corresponde al conjunto de actividades aplicadas sobre una sección completa del pavimento con el fin de corregir o mejorar sus condiciones funcionales y estructurales. El mantenimiento mayor se emplea en pavimentos cuya condición se encuentra bajo el PCI crítico e incluye intervenciones como la reconstrucción y los recapados estructurales. Para efectos de análisis, se asume que, tras la aplicación de un mantenimiento mayor, el PCI del pavimento retorna a un valor de 100 (FAIC, 2021).

2.7.1 Tipos de deterioro y opciones de reparación

La norma ASTM D-5340 establece el procedimiento para la identificación de deterioros en pavimentos flexibles.

Los deterioros característicos de pavimentos, junto con sus posibles causas y las medidas de corrección aplicables para pavimentos flexibles y rígidos se encuentran en las tablas de los anexos C y D respectivamente.

2.8 GAP

A pesar de que en la literatura se han desarrollado diversas metodologías para la gestión y optimización del mantenimiento de pavimentos, gran parte de estos avances se ha concentrado en redes viales urbanas o carreteras, y en menor medida en infraestructura aeroportuaria. Asimismo, aunque existen estudios que incorporan criterios económicos y técnicos en la planificación de intervenciones, todavía se observa una brecha en la aplicación de enfoques de optimización multiobjetivo adaptados al contexto de los pavimentos aeroportuarios en Chile, considerando sus exigencias operacionales, restricciones presupuestarias y disponibilidad limitada de información. En este sentido, persiste la necesidad de desarrollar herramientas que permitan apoyar la toma de decisiones de conservación desde una perspectiva estratégica, integrando simultáneamente el desempeño del pavimento y los costos de intervención en horizontes de análisis de largo plazo. A ello se suma la necesidad de vincular los resultados de la optimización con una matriz de priorización, de manera que las soluciones obtenidas no solo permitan definir planes de mantenimiento técnicamente convenientes, sino también establecer un orden de intervención entre los distintos activos de la red, facilitando su aplicación práctica en escenarios de recursos limitados y fortaleciendo el proceso de asignación de inversiones a nivel de red.

3 Objetivo

Con el propósito de abordar la falta de herramientas que permitan planificar de manera eficiente los trabajos de mantenimiento de pavimentos aeroportuarios en Chile, se propone el desarrollo de una metodología de optimización basada en algoritmos genéticos para la generación de planes de mantenimiento. La planificación de intervenciones en este tipo de infraestructura constituye un problema de elevada complejidad, caracterizado por su naturaleza no lineal, el carácter combinatorio de las decisiones y la coexistencia de objetivos en conflicto, tales como la minimización de costos y la maximización de la condición del pavimento. En este contexto, los métodos heurísticos surgen como una alternativa adecuada frente a los enfoques exactos tradicionales dado que permiten explorar espacios de búsqueda extensos y obtener soluciones aceptables en tiempos computacionales razonables (Torres-Machi, 2015). Dentro de estas técnicas, los algoritmos genéticos destacan por su capacidad para manejar múltiples objetivos y aproximar el Frente de Pareto, entregando un conjunto de soluciones no dominadas que apoyan el proceso de toma de decisiones (Ansarilari & Golroo, 2019).

El aporte metodológico de la presente investigación radica en la formulación de un enfoque de optimización multiobjetivo orientado a la planificación del mantenimiento de pavimentos aeroportuarios, en el cual se integran simultáneamente la minimización de costos y la maximización de la efectividad de las intervenciones. La propuesta incorpora restricciones reales

asociadas a la gestión de la Dirección de Aeropuertos (DAP), particularmente aquellas vinculadas a la disponibilidad presupuestaria y a las condiciones operacionales de la red aeroportuaria. Asimismo, se plantea una representación gráfica del plan de con decisiones a largo plazo en un horizonte de planificación de 20 años, desarrollado a partir de una estructura de datos diseñada para un Sistema de Gestión de Pavimentos Aeroportuarios (SGPA) adaptado al contexto chileno. Desde el punto de vista algorítmico, la metodología considera la adaptación del algoritmo NSGA-II al problema aeroportuario, incorporando mecanismos que relacionan la optimización con procesos de priorización de intervenciones para cumplir presupuestos anuales, lo que posibilita la generación de soluciones coherentes con las restricciones financieras y operacionales de la DAP, contribuyendo a una planificación más eficiente y realista de la conservación de pavimentos aeroportuarios.

El objetivo general es desarrollar una herramienta de optimización multiobjetivo basada en algoritmos genéticos para la generación de planes de mantenimiento de pavimentos aeroportuarios en la red primaria de aeropuertos de Chile, orientada a extender el ciclo de vida de los pavimentos y minimizar el costo total de intervenciones a largo plazo.

Los objetivos específicos se identifican como:

- Definir parámetros de optimización que permitan realizar una gestión sustentable de los pavimentos, principalmente los tratamientos que se aplicaran en la actividad de mantención según el estado de la práctica.
- Seleccionar modelo de optimización más adecuado al contexto del proyecto considerando las características específicas de los pavimentos aeroportuarios y los objetivos de sostenibilidad planteados. Este objetivo específico busca elegir el modelo de optimización que mejor se adapte a las necesidades del proyecto, asegurando que las decisiones tomadas en cuanto a mantenimiento de pavimentos sean eficientes en términos de eficiencia y costo.
- Implementar el modelo de optimización en escenarios representativos de la red primaria de aeropuertos, específicamente en secciones del aeropuerto La Florida, con el fin de analizar su efectividad y comparar los resultados con otras herramientas de gestión de pavimentos.
- Proponer un esquema de integración entre la optimización multiobjetivo y la priorización de intervenciones que permita generar planes de mantenimiento según presupuestos anuales en la red aeroportuaria.

4 Metodología

A continuación, se presenta un resumen de la metodología de investigación:

- **Parámetros**
 - Se identificará y clasificará tratamientos utilizados en la mantención de pavimentos a partir de la exploración de licitaciones disponibles en mercado público y manuales de la FAA (Federal Aviation Administration). De los misma documentos mencionados se obtendrá costo y efectividad de cada tratamiento.
 - Determinar umbrales de aplicación de las distintas intervenciones, considerando criterios técnicos establecidos en manuales internacionales y su ajuste a la realidad operacional y constructiva de los aeropuertos nacionales.

- Recopilar información directa desde la DAP respecto a la frecuencia de ejecución, cantidad de intervenciones y periodicidad de aplicación de tratamientos, con el fin de calibrar los parámetros del modelo y asegurar su representatividad en el contexto chileno.
- **Seleccionar modelo de optimización**
 - A partir de una revisión de literatura, se compararán las principales características, ventajas y limitaciones de métodos de optimización principalmente utilizados para la gestión de pavimentos aeroportuarios, poniendo especial atención en su facilidad de implementación, adaptabilidad y requerimientos de información. Con base en este análisis, se seleccionará el método más adecuado para el caso de estudio del Aeródromo La Florida, considerando los datos disponibles, los objetivos del estudio y las variables de entrada del problema de optimización planteado.
- **Implementación del modelo de optimización**
 - Se seleccionarán secciones del aeropuerto La Florida según disponibilidad de datos, recopilando las curvas de deterioro desarrolladas previamente por el equipo de modelación del proyecto FONDEF.
 - El algoritmo de optimización elegido en el objetivo específico 2 será implementado en dichas secciones, considerando los tratamientos identificados en el objetivo específico 1, junto con sus costos, beneficios en extensión de vida útil.
 - Comparar los planes de mantenimiento generados mediante la metodología propuesta con aquellos obtenidos a partir de herramientas especializadas de gestión de pavimentos, como PAVER y PAVEAIR
- **Integración optimización con priorización de intervenciones**
 - Utilizar matriz de priorización de intervenciones previamente desarrollada que integra los resultados obtenidos del proceso de optimización multiobjetivo, mediante la selección y ponderación de criterios técnicos y económicos relevantes, permitiendo obtener un ranking de las intervenciones analizadas.
 - Incorporar restricciones presupuestarias anuales dentro del esquema de priorización para generar planes de mantenimiento temporalmente consistentes, implementando un procedimiento de asignación de intervenciones que permita seleccionar y programar tratamientos en función del presupuesto disponible y evaluar su impacto en el desempeño del plan de mantenimiento

4.1 Caso Estudio

El Aeródromo La Florida (LSC/SCSE) es el principal terminal aéreo de La Serena, Chile, ubicado a 6 km al este del centro por la Ruta 41-CH. Sirve a la Región de Coquimbo con alto tráfico nacional, operando principalmente con aerolíneas comerciales.



Figura 10. Vista Satelital Aeródromo La Florida. Fuente: (Google Earth, 2025)

Con respecto a los activos de infraestructura cuenta con una única pista física que contiene dos pistas operacionales. La materialidad de los pavimentos corresponde a material asfáltico, aunque las plataforma y áreas de viraje pueden tener algunas secciones de hormigón. Contiene Plataformas de aviación comercial. Actualmente tiene proyectos de ampliación en curso con el objetivo de aumentar la superficie y los márgenes de seguridad.

En la figura 11 se señalan las secciones contempladas en esta investigación, fueron escogidas ya que son las que tienen la disponibilidad de datos necesarios para realizar los proceso que componen un SGPA. Además, en la tabla 3 se señalan las dimensiones y materialidad de las secciones.

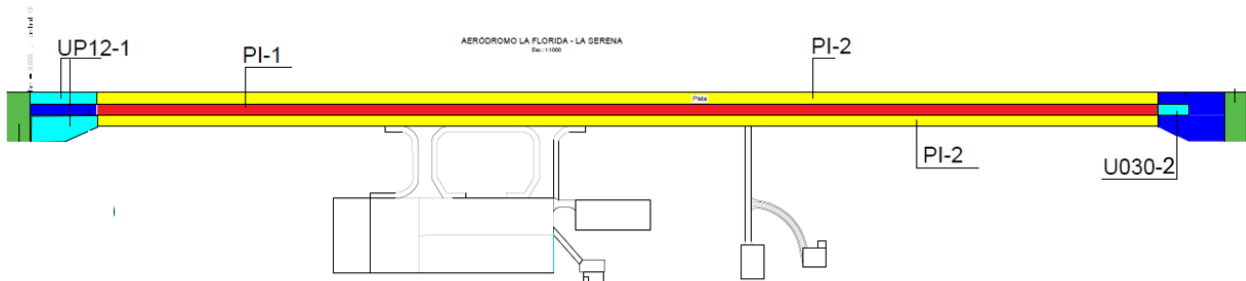


Figura 11. Secciones por analizar

Tabla 3. Información secciones a analizar.

Sección	Superficie [m2]	Tipo de pavimento
PI-1	26475	Asfalto
PI-2	52950	Asfalto
UP12-1	4390	Asfalto
UO30-2	675	Mixto

4.2 Parámetros técnicos

4.2.1 Tratamientos considerados

A partir del análisis de licitaciones obtenidas desde Mercado Público, se pudo corroborar que los tratamientos más adecuados de pavimentos flexibles para considerar en el SGPA son los siguientes.

- **Sellado de grietas:** corresponde a una intervención localizada destinada a evitar el ingreso de agua y materiales incomprensibles al interior del pavimento. La FAA señala que, para grietas longitudinales, transversales, reflejadas y en bloque, las grietas angostas menores a 1/4 de pulgada son demasiado pequeñas para sellarse eficazmente, mientras que las grietas mayores a ese ancho deben limpiarse, eventualmente ensancharse mediante ruteo, y luego rellenarse con un sellante preparado. En ese sentido, su función principal es preservar la integridad superficial del pavimento y retardar la progresión del deterioro (FAA, 2003)
- **Lechada asfáltica:** tratamiento superficial compuesto por emulsión asfáltica, agregado fino, filler mineral y agua, aplicado en forma de mezcla fluida sobre la superficie. La FAA indica que esta mezcla debe tener una consistencia que le permita fluir hacia pequeñas grietas antes del extendido final, y también señala que se utiliza para sellar grietas pequeñas, corregir condiciones superficiales y mejorar la resistencia al deslizamiento. En el contexto aeroportuario, además, la FAA la describe como una medida intermedia para mejorar temporalmente la fricción de la superficie, usualmente con una duración del orden de 2 a 5 años (FAA, 2018).
- **Riego neblina:** asociado al concepto de fog seal o rejuvenecimiento superficial. La FAA lo define como una aplicación liviana de emulsión asfáltica utilizada para rejuvenecer la superficie de un pavimento asfáltico (FAA, 2007).
- **Fresado y Recapado:** intervención de rehabilitación que consiste en remover la capa asfáltica deteriorada y posteriormente colocar una nueva sobre capa para restituir la condición funcional (FAA, 2018).

4.2.2 Condición Inicial del pavimento

Para realizar los análisis correspondientes, es necesario identificar el estado en que se encuentra el pavimento en el año actual. En particular, se requiere conocer el valor actual del PCI, de modo que la simulación considere la programación de actividades de mantenimiento a partir del año siguiente.

En el caso de estudio, los antecedentes más recientes disponibles corresponden a las mediciones efectuadas por FAIC en el año 2024. En la Tabla 4 se presentan los datos obtenidos en la inspección.

Tabla 4. Datos de inspección. Fuente: (FAIC, 2024)

Secciones	Tipo de pavimento	PCI 2024	SCI 2024	Calificación ASTM	Calificación DAP	UMT
PISTA						
PI-1	Asfalto	96	98	Excelente	Adecuado	59
PI-2	Asfalto	80	100	Muy Bueno	Adecuado	118
UP12-1	Asfalto	82	100	Muy Bueno	Adecuado	8
UP12-2	Asfalto	89	100	Excelente	Adecuado	3
UO30-1	Asfalto	81	100	Muy Bueno	Adecuado	13
UO30-2	Asfalto	83	100	Muy Bueno	Adecuado	2
ZPCH-12	Asfalto	84	100	Muy Bueno	Adecuado	4
ZPCH-30	Asfalto	83	100	Muy Bueno	Adecuado	4

4.2.3 Modelos de deterioro

Los modelos de deterioro a considerar han sido desarrollados como parte del proyecto FONDEF ID23I10113 “Desarrollo y validación de sistema de gestión de pavimentos aeroportuarios para la red primaria de Chile” para predecir el comportamiento de pavimentos aeroportuarios específicamente en el aeródromo La Florida. Estos modelos se realizaron a partir de un estudio que analiza la influencia de las variables de diseño estructural y las características del tráfico aéreo (frecuencia de operaciones, tipos de aeronaves y peso) sobre el deterioro de los pavimentos. A partir de registros históricos de PCI, antecedentes estructurales y la construcción de variables de tráfico efectivo acumulado, se desarrollan y comparan modelos regresivos que permitan predecir la evolución del deterioro en el tiempo (Rosas Sebastian, 2026).

En las figuras 12, 13, 14 y 15 se observan gráficamente los modelos desarrollados. En el anexo E, F, G y H se encuentran los valores PCI de cada año en formato tabla.

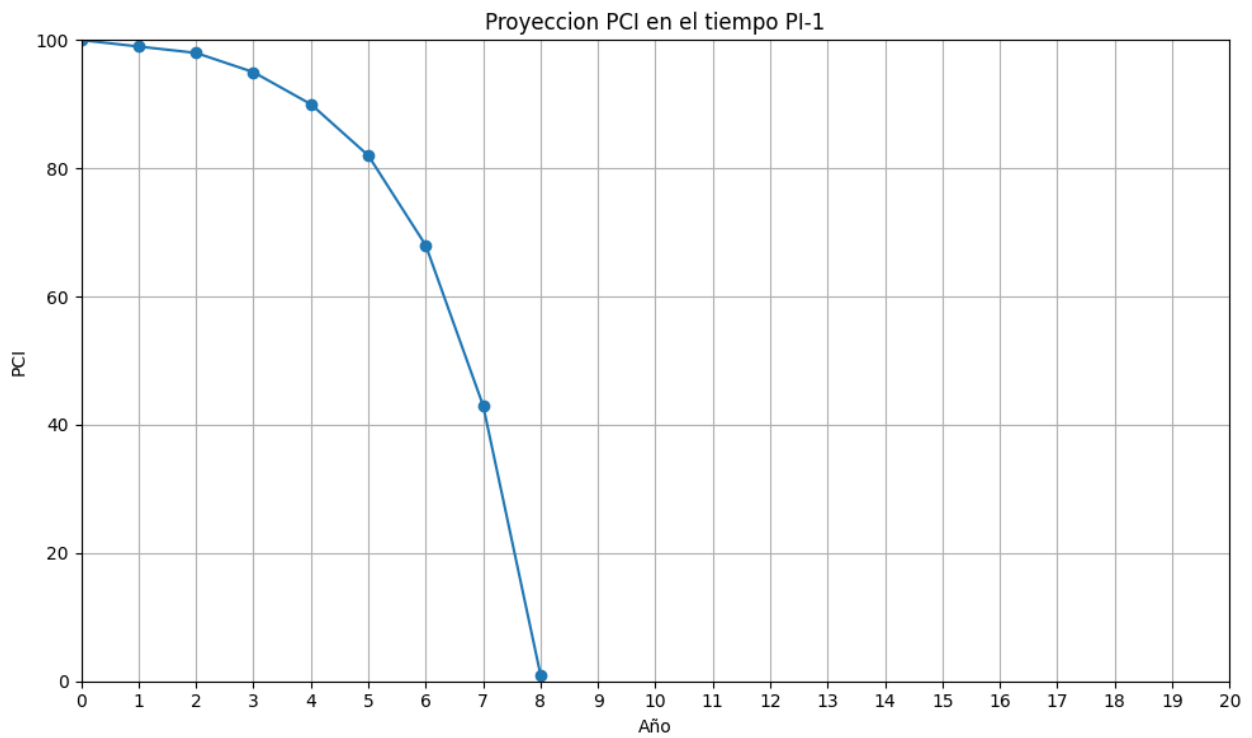


Figura 12. Modelo de deterioro sección PI-1. Fuente: (Rosas, 2026)

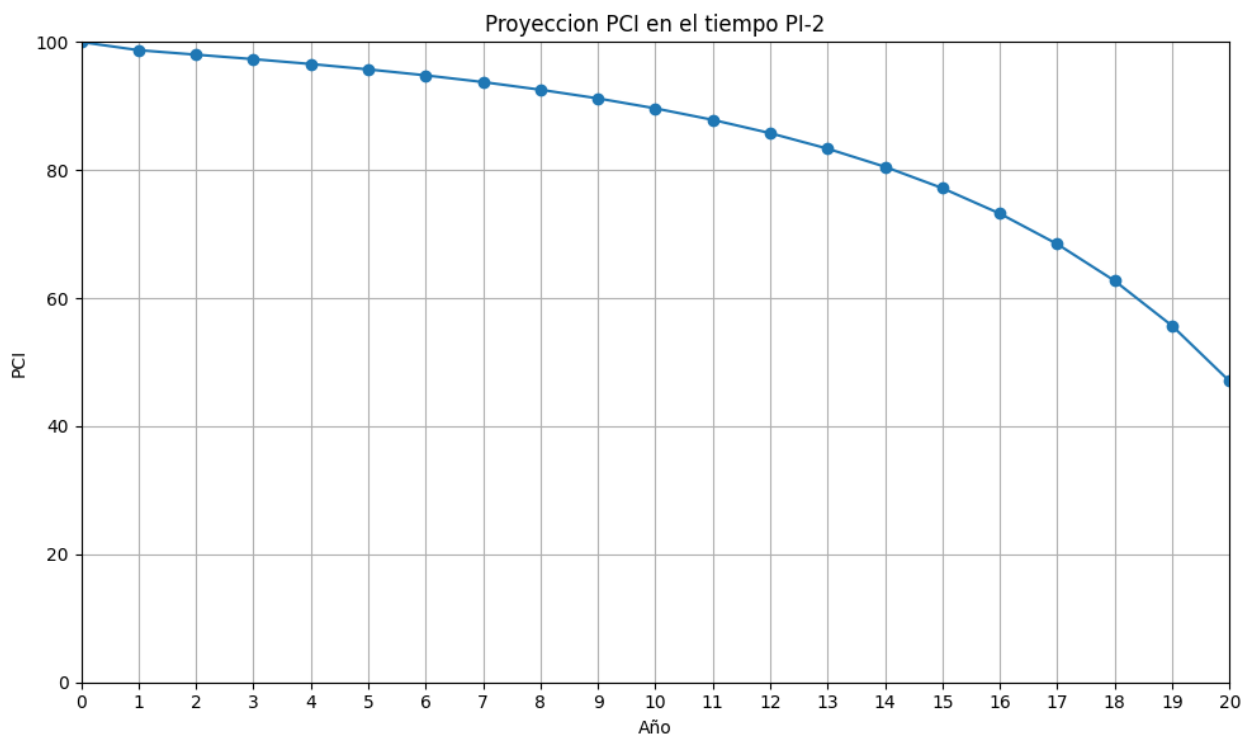


Figura 13. Modelo de deterioro sección PI-2. Fuente: (Rosas, 2026)

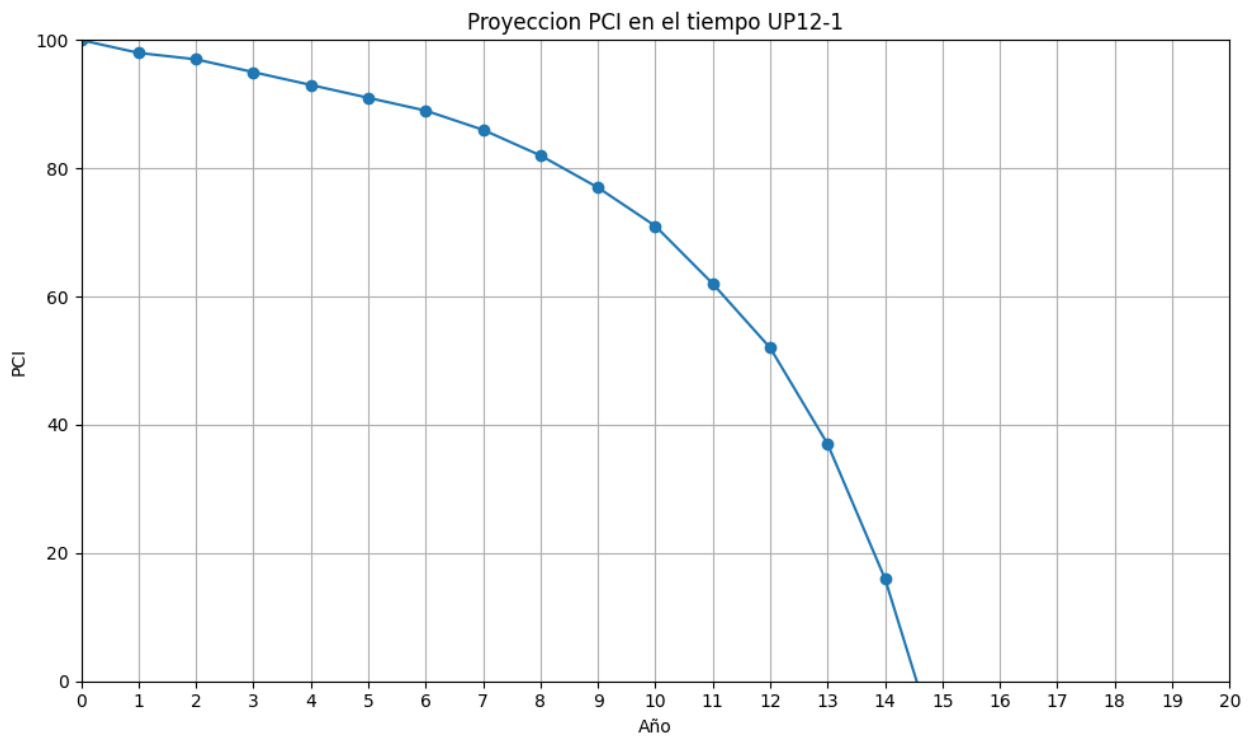


Figura 14. Modelo de deterioro sección UP12-1. Fuente: (Rosas, 2026)

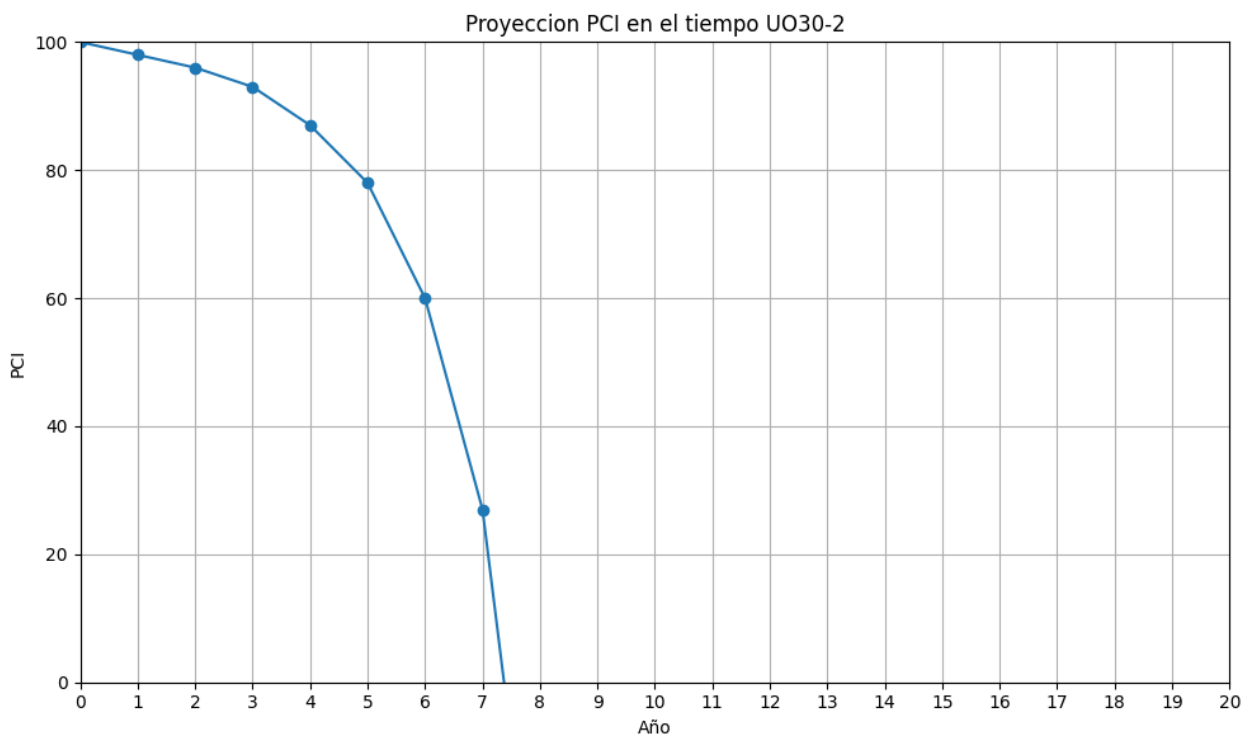


Figura 15. Modelo de deterioro sección UO30-2. Fuente: (Rosas, 2026)

4.2.4 Umbrales de aplicación

Los tratamientos de conservación seleccionados en este estudio fueron definidos considerando su aplicabilidad en pavimentos que presentan distintos tipos de deterioro y diferentes niveles de severidad. Estos tratamientos serán clasificados según lo indicado en la sección 2.6, además el valor PCI crítico corresponderá a 65 (FAIC, 2021).

Debido a la limitada información encontrada sobre la aplicación de tratamientos en pavimentos aeroportuarios chilenos, los umbrales de aplicación utilizados en este estudio fueron obtenidos del libro Pavement Management for Airports, Roads, and Parking Lots, de M. Y. Shahin. Estos valores se presentan en la Tabla 5.

Tabla 5. Umbrales de Aplicación. Fuente: (M. Y. Shahin, 2005)

Tratamiento	Clasificación	Umbral de aplicación [PCI]
Sellado de grietas	Localizado preventivo	≥ 80
Riego de Neblina	Global preventivo	≥ 75
Lechada Asfáltica	Global preventivo	≥ 75
Fresado y Recapado	Rehabilitación – Conservación Mayor	$\geq PCI\ crítico$

4.2.5 Efecto de la aplicación de tratamientos

La aplicación de tratamientos produce un incremento de la vida en servicio del pavimento (ΔSL) lo que provoca un aumento de la condición del pavimento (PCI) esto se representa en la figura 16. En la revisión del estado del arte no se encontraron antecedentes de esto en la gestión de pavimentos aeroportuarios en Chile, por lo tanto los valores de (ΔSL) fueron extraídos del reporte 138 de la Airport Cooperative Research Program perteneciente al National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. 2015, estos valores se señalan en la tabla 6. Cabe destacar que el incremento del PCI (ΔPCI) no es un buen indicador para representar el efecto del tratamiento ya que esto depende de otras variables dependiendo de la zona geográfica en donde se ubica el recinto aeroportuario, por ende, se utiliza la vida de servicio del pavimento (ΔSL) (Shahin, 2005).

Figura 16. Efecto Aplicación de tratamiento. Fuente: Adapado de (Torres Machí, 2015)

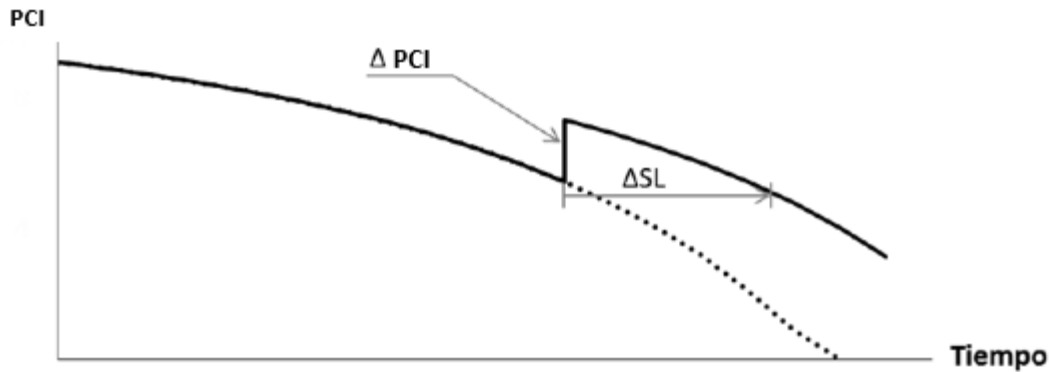


Tabla 6. Efecto de la aplicación de tratamientos Fuente:(National Academies of Sciences, 2015)

Tratamiento	Incremento vida servicio	PCI techo
Sellado de grietas	3	-
Riego de Neblina	2	-
Lechada Asfáltica	4	-
Fresado y Recapado	-	100

Cabe destacar que, para efectos de esta investigación, se asumirá que, una vez incrementado el PCI, la curva del modelo de deterioro original del pavimento se proyectará a partir del punto correspondiente al nuevo valor de PCI alcanzado. Este supuesto se aplicará cada vez que se ejecute una actividad de mantenimiento.

4.3 Parámetros económicos

Los parámetros económicos considerados corresponden a los costos unitarios de los tratamientos. Se optó por expresar estos costos en UF, ya que esta unidad permite proyectarlos en el tiempo de manera más consistente, al ajustarse según la inflación y reducir las distorsiones asociadas a la variación del valor nominal de la moneda. Los valores considerados fueron obtenidos a partir de contratos de pavimentación asociados a licitaciones públicas de la Dirección de Aeropuertos, publicadas en la plataforma Mercado Público, así como de informes elaborados por consultoras como IDOM. Estos costos se presentan en la tabla 7.

En el caso del sellado de grietas, se presenta una dificultad particular, ya que corresponde a una actividad de mantenimiento preventivo localizado y su unidad de medida es el metro lineal. Por esta razón, a diferencia de los demás tratamientos, no se aplica sobre la totalidad de la sección analizada. Para abordar esta situación, se utilizará como referencia el proyecto ‘Conservación Rutinaria Aeródromo La Florida, 2023’, en el cual, según el presupuesto, se ejecutó un total de

1.410 m de sello de grietas en la sección PI-1, alcanzando un costo aproximado de 278 UF. Considerando que la superficie total de PI-1 corresponde a 26.475 m², se estimó un costo equivalente de aplicación de aproximadamente 0,0105 UF/m²

Tabla 7. Costos unitarios de los tratamientos. Fuente:(Mercado Publico, 2025 & IDOM,2022)

Tratamiento	Unidad	Costo [UF]
Sellado de grietas	[m]	0,197
	[m ²]	0,0105
Riego de Neblina	[m ²]	0,062
Lechada Asfáltica	[m ²]	0,13
Reconstrucción	[m ²]	2,664

4.4 Parámetros ambientales

En el marco del proyecto FONDEF, se desarrolló una propuesta para incorporar un criterio de costo ambiental en el SGPA, basado en la estimación de emisiones de CO₂ asociadas a las actividades de conservación y su valorización mediante el Precio Social del Carbono. Para ello, se planteó el uso de la herramienta PaLATE, integrando este criterio ambiental en conjunto con los criterios técnicos y económicos ya existentes, con una metodología diseñada para ser replicable en distintos aeropuertos de la red primaria nacional (Valderrama, 2025). Sin embargo, los valores obtenidos resultaron ser muy bajos, por lo que, bajo la lógica adoptada en el presente estudio el efecto no era significativo y, en consecuencia, este criterio no fue incorporado. Sin embargo, esta información si será útil para el análisis de resultados.

En la tabla 8 se presentan los costos ambientales calculados, se observa que para el caso del Fresado y Recapado las secciones tienen costos diferentes, eso se debe a que a diferencia de los otros tratamientos, en el Fresado y Recapado se trabaja sobre la materialidad existente de la sección.

Tabla 8. Costos Ambientales. Fuente:(Valderrama Daniela, 2025).

Tratamiento		Costo ambiental 2025
Sellado de grietas		0.0017669 [USD/m]
Riego de Neblina		0.0014530 [USD/m ²]
Lechada Asfáltica		0.0019693 [USD/m ²]
Fresado y Recapado	PI-1	0.0456464 [USD/m ²]
Fresado y Recapado	PI-2	0.0254984 [USD/m ²]
Fresado y Recapado	UP12-2	0.0456464 [USD/m ²]
Fresado y Recapado	UO30-2	0.0254984 [USD/m ²]

4.5 Seleccionar modelo de optimización

Para evaluar cada uno de los métodos estudiados se aplicará la metodología señalada en la figura 17. En primer lugar, se analizará qué tipo de metodología se utiliza para asignar las actividades de mantenimiento ya sea optimización aproximada, matemática o algún tipo de análisis costo beneficio, luego se analizará tiempos de análisis ya que para el caso de estudio se planea un horizonte de planificación a largo plazo (20 años aproximadamente). Lo siguiente es evaluar el indicador del pavimento esto ya sea para ver si se basa en el estado superficial del pavimento, rugosidad y/o fricción. Por último, se analizará cuántos criterios de sustentabilidad se cumplen.

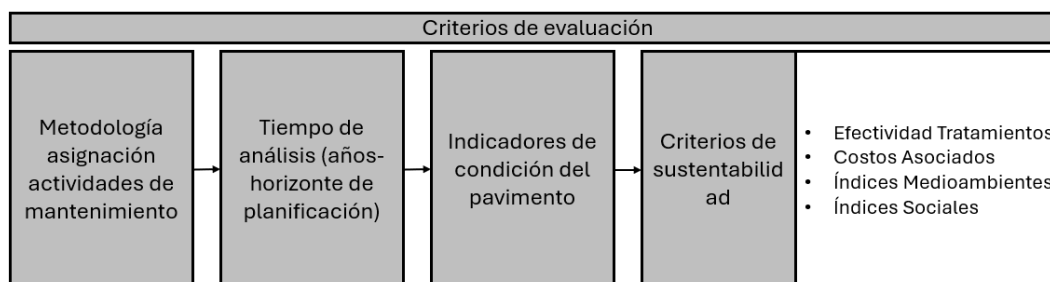


Figura 17. Metodología de evaluación de los distintos métodos

En las tablas 1 y 2 se resume el análisis realizado a diferentes trabajos de investigación en donde se aplicaron diferentes herramientas para generar planes de mantenimientos para pavimentos aeroportuarios.

Tabla 9. Información de investigaciones revisadas

Autores	país	Aeropuerto	Met. Optimización	T. Análisis [Años]
(Ansarilari & Golroo, 2020)	Irán	Mehrabad y Imam Khomeini	NSGA II	5
(Arabali et al., 2017)	USA	No Especifica	C-B & LCCA	
(Noruzoliaee & Zou, 2019)	USA	O'Hare , Chicago	PL & MILP	16
(Ling et al., 2024)	China	Sunan Shuofang	PD	5
(Di Mascio & Moretti, 2019)	Italia	(información Privada)	C-B	20
(Di Graziano et al., 2024)	Italia	Catania	H & KM	6
(Ragusa et al., 2022)	Italia	No Especifica	H	6
(Roh et al., 2023)	Corea	4 aeropuertos (N.E)	CCO	5-7-10

NOTA: NSGA II=Algoritmo Genético de clasificación no dominada, C-B= Costo-Beneficio, LCCA=Análisis del costo de vida , PL=programación lineal, MILP=programación Lineal Entera Mixta, PD= Programación Dinámica, H=Heurísticas, KM= K-Means, CCO=optimización de casos de condición.

Tabla 10. Indicador de condición y criterios de la optimizacion

Autores	Indicador	Eficiencia	Costo	Medioambiente	Social
Ansarilari & Golroo (2019)	PCI	✓	✓		
Arabali et al., (2017)	PCI	✓	✓		
Noruzoliaee, & Zou,(2019)	PCI		✓		
Ling et al. (2024)	PCI	✓	✓		
Di Mascio & Moretti. (2019)	PCI IRI	✓	✓		
Di Graziano et al, 2024	PCI IRI		✓		✓
Ragusa et al. (2024).	PCI IRI RL	✓	✓		✓
Roh et al, (2023)	PCI	✓	✓		✓

Los enfoques de gestión y planificación de mantenimiento de pavimentos aeroportuarios estudiados indican que ninguna de las metodologías aplicada toma en cuenta índices medioambientales, señalando una importante área de oportunidad para integrar este criterio de sostenibilidad en estudios futuros. En contraste, todos los métodos estudiados emplean el PCI como indicador principal para evaluar el estado del pavimento.

Únicamente los trabajos de los autores Noruzoliaee & Zou (2019) y de Di Mascio y Moretti (2019) contemplan horizontes de planificación de más de 10 años, lo cual indica que la mayoría de los estudios tienen límites en términos de tiempo, se enfocan en planes a corto y mediano plazo.

Tres estudios consideran criterios sociales asociándolos a la asignación de recursos que tratan de minimizar los tiempos de trabajo, esto con el objetivo de no afectar las operaciones y con ello los tiempos de espera de los usuarios.

Los estudios utilizan métodos de optimización matemática, optimización heurística y análisis de costo-beneficio. Estos métodos son esenciales para tomar decisiones eficientes en cuanto a la distribución de recursos y la priorización de proyectos, aunque su enfoque sigue siendo

mayormente técnico, dejando espacio para la integración de otros criterios como los medioambientales y sociales en la optimización dentro de un SGPA.

A partir de la revisión de la literatura y del análisis de los datos del caso de estudio, con miras a aplicar posteriormente la optimización a una escala mayor en la red primaria, se establece lo siguiente:

- Debido a que no se dispone de todos los datos necesarios de la red primaria, no será posible realizar una optimización con enfoque holístico. Por lo tanto, la metodología a desarrollar adoptará un enfoque secuencial, en el cual primero se efectuará un análisis a nivel de sección y, posteriormente, se utilizará una matriz de priorización para escalar la toma de decisiones hacia una gestión a nivel de red.
- Debido a la calidad y cantidad de datos disponibles sobre las intervenciones en la red primaria, y particularmente en el Aeródromo La Florida, el uso de herramientas de machine learning o inteligencia artificial resulta poco viable. Por esta razón, no se opta por estos métodos para la generación de planes de mantenimiento.
- En la literatura se señala que los métodos de programación matemática suelen requerir un alto esfuerzo computacional. Considerando que se busca incorporar la metodología de optimización en un software SGPA, se descartará el uso de estos métodos.
- Por el contrario, los algoritmos heurísticos representan una alternativa más adecuada, ya que permiten explorar espacios de búsqueda amplios y complejos con un esfuerzo computacional razonable. Además, su flexibilidad facilita su incorporación en un software SGPA para la generación de planes de mantenimiento.

Para efectos de esta investigación, la elección de algoritmos genéticos se justifica porque el problema de planificación del mantenimiento de pavimentos corresponde a un problema combinatorio, de naturaleza multiobjetivo y sujeto a múltiples restricciones, en el que deben definirse simultáneamente el tipo de intervención, su momento de aplicación y su efecto sobre el desempeño y el costo a lo largo del horizonte de análisis. A diferencia de los métodos clásicos de optimización, los algoritmos genéticos permiten explorar este tipo de espacios de búsqueda sin requerir continuidad, convexidad ni información de gradiente. Además, al trabajar con una población de soluciones, permiten aproximarse de manera simultánea a distintas alternativas eficientes y, en problemas multiobjetivo, identificar soluciones no dominadas en una sola corrida del algoritmo. En particular, el método NSGA-II incorpora un procedimiento rápido de clasificación no dominada, elitismo y mecanismos de preservación de diversidad, características que lo han posicionado como una de las técnicas más utilizadas en problemas de optimización multiobjetivo.

Su uso resulta especialmente pertinente en gestión de pavimentos, ya que este tipo de problemas involucra decisiones de programación y asignación de tratamientos en horizontes multianuales, donde el espacio de soluciones crece rápidamente con el tamaño del problema. En la literatura se ha señalado que los problemas de gestión de pavimentos son particularmente aptos para heurísticas de búsqueda dirigida, como los algoritmos genéticos, debido a que las técnicas de optimización exacta pueden volverse poco manejables a medida que aumenta la dimensión del problema.

Asimismo, existen aplicaciones específicas en mantenimiento de pavimentos donde se han empleado algoritmos genéticos multiobjetivo para minimizar costos y maximizar la condición de la red, obteniendo conjuntos de soluciones de Pareto útiles para apoyar la toma de decisiones. Incluso, estudios más recientes han aplicado NSGA-II directamente en sistemas de gestión de pavimentos, confirmando su utilidad práctica para problemas de conservación a nivel de red.

4.6 Definición del problema de optimización

4.6.1 Funciones Objetivo

Para el desarrollo del proceso de optimización se consideran dos funciones objetivo, los cuales se describen a continuación:

1. **F₁: Maximizar el Área bajo la Curva (ABC):** Este tipo de análisis permite cuantificar la eficiencia del plan de mantenimiento que se seleccione como óptimo. En lo específico, cuanto mayor sea el ABC de la curva PCI vs Tiempo, mejor desempeño posee un determinado plan. En síntesis, refleja la capacidad del plan para mantener la condición del pavimento a lo largo del tiempo (Torres-Machí, 2015; Ansarilari & Golroo, 2019). Esta función objetivo se expresa matemáticamente en la ecuación 1. Para su implementación, se utilizó el método del trapecio como procedimiento de cálculo numérico del área bajo la curva. El código desarrollado en Python para efectuar dicho cálculo se presenta en el Anexo I.

$$\max f_1(x) = \max \sum_{n=1}^N ABC_n \quad (1)$$

2. **F₂: Minimizar el Costo Total:** El costo total se estima en función del costo unitario de la acción de mantenimiento de cada año, pero se adicionan penalizaciones que corresponden a costos adicionales aplicados cuando se violan restricciones u ocurren condiciones no deseadas (por ejemplo, exceso de intervenciones o reconstrucciones consecutivas). De esta forma, el costo total se expresa con la ecuación 2 y la función objetivo se expresa matemáticamente con la ecuación 3.

$$C_{total} = C_{intervencion} + C_{penalizacion} \quad (2)$$

$$\min f_2(x) = \min \sum_{n=1}^{20} Costo_{totaln} \quad (3)$$

4.6.2 Restricciones consideradas

Respecto a las restricciones del proceso de optimización, se menciona que estas guardan relación con un nivel mínimo tolerable de PCI que garantice la operación segura de aeronaves, que no se generen actividades correctivas masivas consecutivas, es decir, procesos de reconstrucción u obras de conservación mayor en años corridos para el mismo sector de la pista y, también, que se limite la cantidad de intervenciones en el horizonte de planificación de actividades correctivas.

El detalle de las restricciones se observa en la tabla 11:

Tabla 11. Muestra las restricciones incorporadas en el proceso de Optimización

Nº	Restricción	Descripción	Tipo de Control
1	$PCI \geq PCI_{crítico}$	Garantiza que la condición del pavimento no descienda por debajo del nivel aceptable	Penalización al costo o descarte directo de la solución propuesta
2	No conservaciones mayores consecutivos	Evita acciones de reconstrucción o Fresado y recapado en etapas consecutivas (año tras año, por ejemplo)	Penalización o restricción directas
3	Nº de Intervenciones $\leq N$	Limita el número total de acciones de mantenimiento aplicadas durante el horizonte de planificación	Penalización si se excede el límite
4	Infringir Umbrales de aplicación de los tratamientos	Garantiza la correcta aplicación de actividades de mantenimiento.	Penalización al costo si no se respetan umbrales

4.7 Metodología Desarrollo Algoritmo multiobjetivo

A continuación, se describe el paso a paso para el desarrollo de los componentes del algoritmo

4.7.1 Estructura de las soluciones

Cuando se trabaja con algoritmos de carácter evolutivo, las soluciones se denominan cromosomas, mientras que los elementos que conforman cada solución se conocen como genes.

Para efectos de esta investigación, se adoptará un horizonte de planificación de 20 años, valor establecido por la FAA, ya que corresponde a la estimación de la vida útil estructural de un pavimento aeroportuario. En la Figura 18 se presenta la representación de un cromosoma para dicho horizonte de planificación. En este caso, X_1, X_2, \dots, X_n corresponden a los genes, los cuales pueden tomar los valores 0, 1, 2, 3 o 4, asociados a distintos tipos de actividades de mantenimiento. En la Tabla 12 se indica la correspondencia de cada uno de estos índices.

Año	1	2	3	4	5	6	7	8	9	...	20
Intervención	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8	X_9	...	X_{20}

Figura 18. Estructura de una solución-cromosoma

Tabla 12. Índice de cada actividad de mantenimiento

Índice	Actividad
0	No hacer Nada
1	Sellado de Grietas
2	Riego de neblina
3	Lechada Asfáltica
4	Fresado y Recapado

4.7.2 Población inicial

Para Agilizar la exploración de soluciones validas dentro del espacio de búsqueda, a partir de la información recopilada junto al personal de la Dirección de Aeropuertos, se generan soluciones que presentan las siguientes características:

- Intervenciones cada 2-3 años
- Aplicar una conservación mayor cuando se cumple la mitad del ciclo de vida del pavimento

Inmediatamente después de crear la población inicial, cada uno de los planes son evaluado por las funciones objetivos (Area bajo la curva y Costo con penalizaciones). En la tabla 13 para efectos de ejemplificar se muestra una población de tamaño 10 con las evaluaciones de las funciones objetivo.

Tabla 13. Ejemplo de Población Inicial

index	Plan	ABC	Costo
0	0,0,0,0,1,0,0,1,0,0,0,4,0,0,0,1,0,0,0,3	496.0	64271.61518933325
1	0,0,0,0,2,0,0,3,0,0,4,0,0,0,2,0,0,2,0,0	515.5	1.3593287197231834
2	0,0,0,1,0,0,0,4,0,0,0,2,0,0,2,0,0,2,0,0	619.5	1.3545
3	0,0,0,0,0,3,0,0,4,0,0,3,0,0,0,3,0,0,2,0	505.0	5.137215738985443
4	0,0,0,0,2,0,0,0,4,0,0,0,2,0,0,2,0,0,2,0	625.5	1.235
5	0,0,0,2,0,0,0,4,0,0,0,1,0,0,0,2,0,0,0,2	516.5	64271.62568933325
6	0,0,0,0,0,0,1,0,0,0,4,0,0,1,0,0,3,0,0,0	591.5	1.3545
7	0,0,0,0,0,1,0,0,0,4,0,0,0,3,0,0,0,2,0,0	606.0	1.2349999999999999
8	0,0,0,0,3,0,0,0,4,0,0,0,1,0,0,0,3,0,0,1	543.0	2.0667115051903115
9	0,0,0,3,0,0,1,0,0,0,4,0,0,0,2,0,0,1,0,0	638.5	1.303

4.7.3 Fast non-dominated sort

Una vez evaluadas las soluciones de la población en función de los objetivos definidos, se aplica el procedimiento de ordenamiento rápido no dominado (fast non-dominated sort), cuyo propósito es clasificar los individuos según su nivel de dominancia dentro de la frontera de Pareto. Para ello, se compara cada solución con el resto de la población, identificando, por una parte, las soluciones

que domina y, por otra, la cantidad de soluciones que la dominan. Aquellos individuos que no son dominados por ninguna otra solución son asignados al primer frente no dominado.

Posteriormente, estas soluciones se remueven de manera conceptual del conjunto analizado y se actualiza la información de dominancia de los individuos restantes. De este modo, las soluciones que pasan a no ser dominadas conforman el segundo frente, y el procedimiento se repite sucesivamente hasta clasificar la totalidad de la población. Esta etapa resulta fundamental en NSGA-II, ya que permite establecer una jerarquía entre las soluciones candidatas, priorizando aquellas que presentan un mejor equilibrio entre los objetivos en conflicto.

En la tabla 14 en la columna Rank se observan los resultados del ordenamiento no dominado de las soluciones generadas en la población inicial. El rank 0 representa el primer frente no dominado. También se observa que el plan numero 9 tiene un alto costo producto de que se encuentra penalizado y por ende está en el último frente de dominancia. En el Anexo J se encuentra el código en Python desarrollado para obtener la columna Rank.

Tabla 14. Fast non-dominated sort de la población inicial

index	Plan	ABC	Costo	Rank
0	0,0,0,0,1,0,0,1,0,0,0,4,0,0,0,1,0,0,0,3	558.5	1.1835	0
1	0,0,0,3,0,0,1,0,0,0,4,0,0,0,2,0,0,1,0,0	619.5	1.235	0
2	0,0,0,0,0,3,0,0,4,0,0,3,0,0,0,3,0,0,2,0	597.5	2.134711505190311	1
3	0,0,0,0,3,0,0,0,4,0,0,0,1,0,0,0,3,0,0,1	594.5	1.303	1
4	0,0,0,0,2,0,0,3,0,0,4,0,0,0,2,0,0,2,0,0	542.0	1.9987115051903117	2
5	0,0,0,1,0,0,0,4,0,0,0,2,0,0,2,0,0,2,0,0	537.0	1.533608564013841	2
6	0,0,0,2,0,0,0,4,0,0,0,1,0,0,0,2,0,0,0,2	517.5	3.049909119274452	3
7	0,0,0,0,0,1,0,0,0,4,0,0,0,3,0,0,0,2,0,0	531.0	23.70737663676803	3
8	0,0,0,0,2,0,0,0,4,0,0,0,2,0,0,2,0,0,2,0	494.5	24.005820840920283	4
9	0,0,0,0,0,0,1,0,0,0,4,0,0,1,0,0,3,0,0,0	490.5	64271.551418311356	5

4.7.4 Crowding distance

Una vez clasificada la población en frentes no dominados, el algoritmo NSGA-II calcula la distancia de hacinamiento (crowding distance) para cada individuo perteneciente a un mismo frente. Este indicador permite estimar cuán aislada se encuentra una solución respecto de sus vecinas en el espacio de objetivos. En términos prácticos, una mayor distancia de hacinamiento indica que la solución se ubica en una zona menos poblada, por lo que resulta conveniente conservarla para mantener una adecuada diversidad dentro del frente de Pareto.

Este procedimiento cumple un rol fundamental en NSGA-II, ya que cuando dos soluciones pertenecen al mismo frente no dominado, el algoritmo prioriza aquella que presenta una mayor crowding distance. De esta forma, no solo se favorecen soluciones de buen desempeño multiobjetivo, sino también una distribución más uniforme de alternativas a lo largo del frente de Pareto, lo que mejora la capacidad exploratoria del algoritmo y la calidad del conjunto final de soluciones. En la tabla 15 se observan los resultados de la distancia de hacinamiento, estos dan como resultado infinito ya que solo hay dos soluciones del mismo frente por lo tanto estos corresponden a los extremos, si por ejemplo el 0 tuviera una tercera solución tendría un valor numérico.

Tabla 15. Crowding distance de la población inicial

index	Plan	ABC	Costo	Rank	Crowding
0	0,0,0,0,1,0,0,1,0,0,0,4,0,0,0,1,0,0,0,3	558.5	1.183	0	Infinity
1	0,0,0,3,0,0,1,0,0,0,4,0,0,0,2,0,0,1,0,0	619.5	1.235	0	Infinity
2	0,0,0,0,0,3,0,0,4,0,0,3,0,0,0,3,0,0,2,0	597.5	2.134	1	Infinity
3	0,0,0,0,3,0,0,0,4,0,0,0,1,0,0,0,3,0,0,1	594.5	1.303	1	Infinity
4	0,0,0,0,2,0,0,3,0,0,4,0,0,0,2,0,0,2,0,0	542.0	1.998	2	Infinity
5	0,0,0,1,0,0,0,4,0,0,0,2,0,0,2,0,0,2,0,0	537.0	1.533	2	Infinity
6	0,0,0,2,0,0,0,4,0,0,0,1,0,0,0,2,0,0,0,2	517.5	3.049	3	Infinity
7	0,0,0,0,0,1,0,0,0,4,0,0,0,3,0,0,0,2,0,0	531.0	23.70	3	Infinity
8	0,0,0,0,2,0,0,0,4,0,0,0,2,0,0,2,0,0,2,0	494.5	24.00	4	Infinity
9	0,0,0,0,0,0,1,0,0,0,4,0,0,1,0,0,3,0,0,0	490.5	64271.5	5	Infinity

4.7.5 Selección de padres

Una vez calculado el rango de no dominancia y la distancia de hacinamiento de cada individuo, se utiliza un torneo binario para seleccionar las soluciones que actuarán como padres en la etapa de reproducción. Este procedimiento consiste en escoger dos individuos de la población y compararlos. El criterio de comparación es el siguiente: entre dos soluciones, se prefiere aquella que posea un menor rango de no dominancia, ya que pertenece a un frente de mejor calidad. Si ambas soluciones pertenecen al mismo frente, entonces se selecciona aquella que presente una mayor crowding distance.

En la figura 19 se tienen los planes que fueron seleccionados como padres a partir del torneo binario. Se observa que los planes 8 y 9 los cuales tienen los frentes mas dominados, frente 4 y 5 respectivamente, no fueron seleccionados por lo que se puede decir que la herramienta si selecciona las mejores soluciones. En el anexo K se encuentra el código de Python con esta herramienta.

Índice ganador: 0	Plan: [0, 0, 0, 0, 1, 0, 0, 1, 0, 0, 0, 4, 0, 0, 0, 1, 0, 0, 0, 3]
Índice ganador: 0	Plan: [0, 0, 0, 0, 1, 0, 0, 1, 0, 0, 0, 4, 0, 0, 0, 1, 0, 0, 0, 3]
Índice ganador: 5	Plan: [0, 0, 0, 2, 0, 0, 0, 4, 0, 0, 0, 1, 0, 0, 0, 2, 0, 0, 0, 2]
Índice ganador: 2	Plan: [0, 0, 0, 1, 0, 0, 0, 4, 0, 0, 0, 2, 0, 0, 2, 0, 0, 2, 0, 0]
Índice ganador: 4	Plan: [0, 0, 0, 0, 2, 0, 0, 0, 4, 0, 0, 0, 2, 0, 0, 2, 0, 0, 2, 0]
Índice ganador: 3	Plan: [0, 0, 0, 0, 0, 3, 0, 0, 4, 0, 0, 3, 0, 0, 0, 3, 0, 0, 2, 0]
Índice ganador: 5	Plan: [0, 0, 0, 2, 0, 0, 0, 4, 0, 0, 0, 1, 0, 0, 0, 2, 0, 0, 0, 2]
Índice ganador: 3	Plan: [0, 0, 0, 0, 0, 3, 0, 0, 4, 0, 0, 3, 0, 0, 0, 3, 0, 0, 2, 0]
Índice ganador: 4	Plan: [0, 0, 0, 0, 2, 0, 0, 0, 4, 0, 0, 0, 2, 0, 0, 2, 0, 0, 2, 0]
Índice ganador: 3	Plan: [0, 0, 0, 0, 0, 3, 0, 0, 4, 0, 0, 3, 0, 0, 0, 3, 0, 0, 2, 0]

Figura 19. Padres obtenidos del torneo binario

4.7.6 Operadores genéticos

Una vez seleccionados los individuos que actuarán como padres mediante torneo binario, el algoritmo aplica los operadores genéticos de cruce y mutación con el objetivo de generar una nueva población de soluciones descendientes.

4.7.6.1 Cruzamiento

El operador de cruce realiza la combinación información de dos soluciones parentales para generar dos descendientes. En términos generales, este procedimiento busca transmitir hacia la descendencia características presentes en ambos padres, favoreciendo la generación de nuevas soluciones potencialmente mejores.

En la figura 20 se observa el cruzamiento en el año 15 de las soluciones padre 1 y 2 obteniendo las soluciones hijo 1 y 2.

En el anexo M se encuentra código para realizar el cruzamiento a partir de dos soluciones padre.

Padre 1:	[0, 0, 0, 0, 2, 0, 0, 0, 4, 0, 0, 0, 2, 0,	0, 2, 0, 0, 2, 0]
Padre 2:	[0, 0, 0, 3, 0, 0, 1, 0, 0, 0, 4, 0, 0, 0,	2, 0, 0, 1, 0, 0]
Hijo 1:	[0, 0, 0, 0, 2, 0, 0, 0, 4, 0, 0, 0, 0, 0,	2, 0, 0, 1, 0, 0]
Hijo 2:	[0, 0, 0, 3, 0, 0, 1, 0, 0, 0, 4, 0, 2, 0,	0, 2, 0, 0, 2, 0]

Figura 20. Cruzamiento de soluciones

4.7.6.2 Mutación

Luego del cruzamiento se debe aplicar el operador de mutación el cual introduce modificaciones aleatorias en una solución individual, alterando uno o más de sus genes con el fin de incorporar variabilidad en la población. Su función principal es evitar la pérdida de diversidad y reducir el riesgo de convergencia prematura hacia regiones limitadas del espacio de búsqueda. En la figura 21 se observan los efectos de la mutación en la solución hijo 1. En el Anexo N se encuentra el código Python para realizar la mutación.

Hijo 1:	[0, 0, 0, 0, 2, 0, 0, 0, 4, 0, 0, 0, 0, 0, 2, 0, 0, 1, 0, 0]
Hijo 1:	[0, 0, 0, 0, 3, 0, 0, 0, 4, 0, 0, 0, 0, 0, 2, 0, 0, 1, 0, 0]

Figura 21. Mutación de solución hijo

4.7.7 Nueva Generación de soluciones

A partir de los operadores genéticos se crea la nueva población de hijos la cual se expresa como:

$$Población_{nueva} = Población_{inicial} + Población_{hijos} \quad (4)$$

Esta nueva población debe ser evaluada por las funciones objetivo y repetir el mismo proceso con los operadores genéticos. Esto se realiza una cantidad determinada de veces, la cual se determina a partir de una calibración del algoritmo.

De $Población_{nueva}$ se extraen las mejores soluciones que contengan menor Rank, ósea las que están en los primeros frentes hasta tener una población de N soluciones, la misma cantidad de $Población_{inicial}$.

4.7.8 Selección de la mejor solución

Una vez generada la población nueva con un número determinado de soluciones, se procede a identificar la frontera de Pareto. Posteriormente, con el fin de seleccionar, entre las soluciones no dominadas, aquella que represente la alternativa más conveniente, se recurre a la ecuación (5) la cual corresponde a una fórmula de parametrización propuesta por Fwa et al. (2000).

$$d_k = \sqrt{[O^*(1, x) - O^*(1, \text{minimum})]^2 + [O^*(2, x) - O^*(2, \text{maximum})]^2} \quad (5)$$

Lo que se debe realizar es determinar el punto de intersección definido entre la solución que presenta el mayor valor de la función objetivo a maximizar y aquella que presenta el menor valor de la función objetivo a minimizar. Posteriormente, para cada una de las soluciones de la frontera de Pareto se calcula la distancia mediante la ecuación 5, y se selecciona como mejor solución aquella que presenta la menor distancia, esto se puede visualizar en la figura 21.

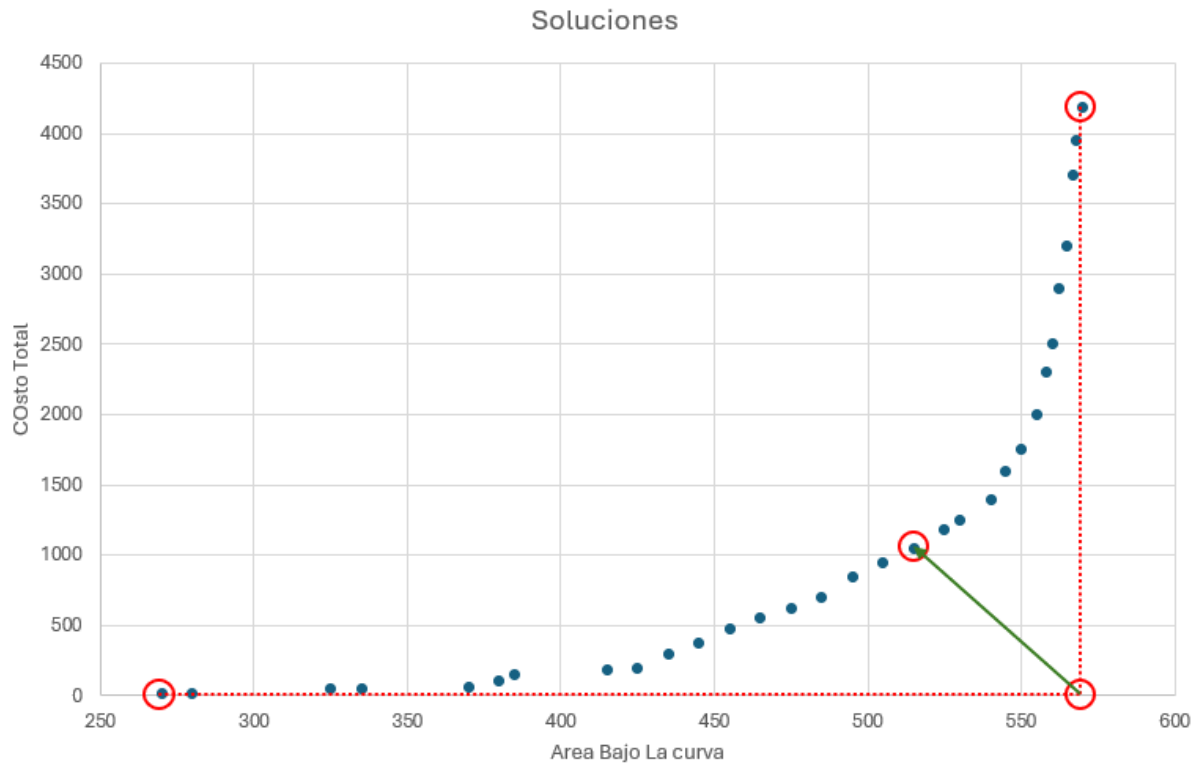


Figura 21. Ejemplo de aplicación de ecuación de parametrización

4.7.9 Calibración del algoritmo

Como se mencionó en la Sección 3.7, el algoritmo genético multiobjetivo requiere definir, entre sus parámetros principales, el tamaño de la población inicial y el número de generaciones. Para determinar ambos valores, se realizó un conjunto de corridas del algoritmo, con el fin de identificar el punto en que las soluciones convergen. Esta convergencia se evaluó a partir del comportamiento de las funciones objetivo-asociadas a la maximización y minimización.

A partir de los gráficos 22, 23, 24, 25 y 26 se observa que la que tiene mejores soluciones son la poblaciones 100 y 200, pese a que la población de tamaño 200 converge con menos generaciones esta demora el doble de tiempo en realizar el análisis a comparación de la de tamaño 100.

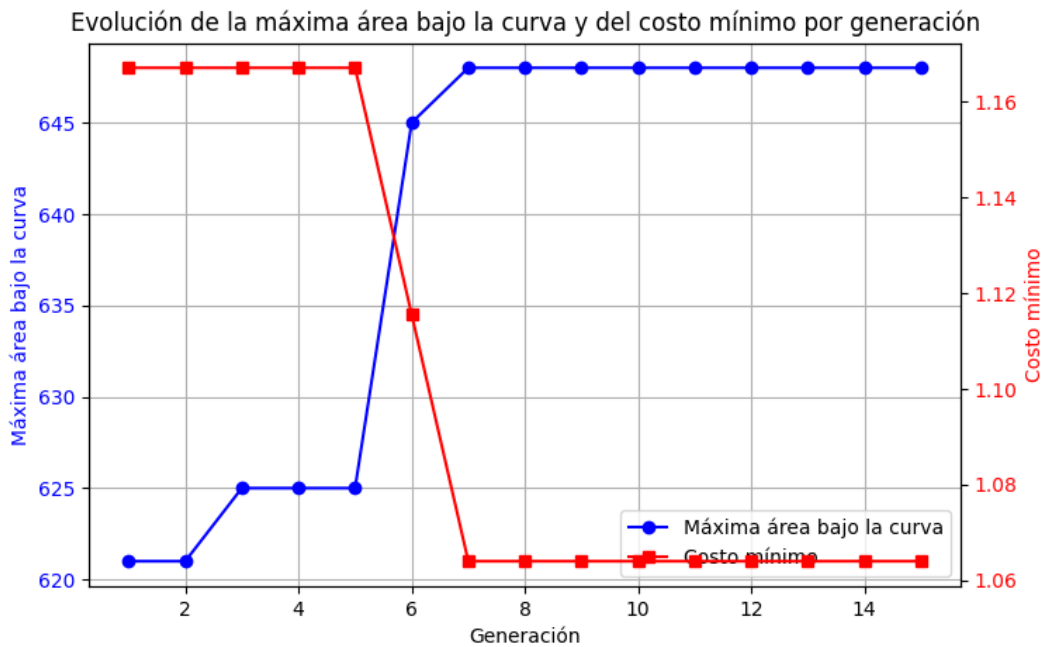


Figura 22. Valores de las funciones objetivos por cada generación para una población inicial de tamaño 10

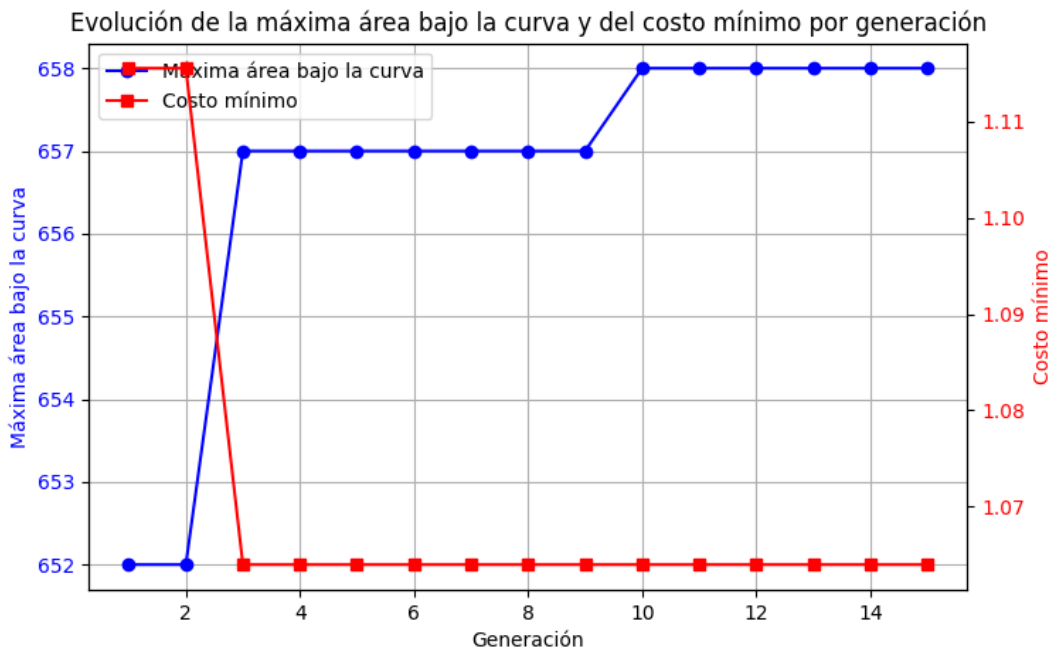


Figura 23. Valores de las funciones objetivos por cada generación para una población inicial de tamaño 25

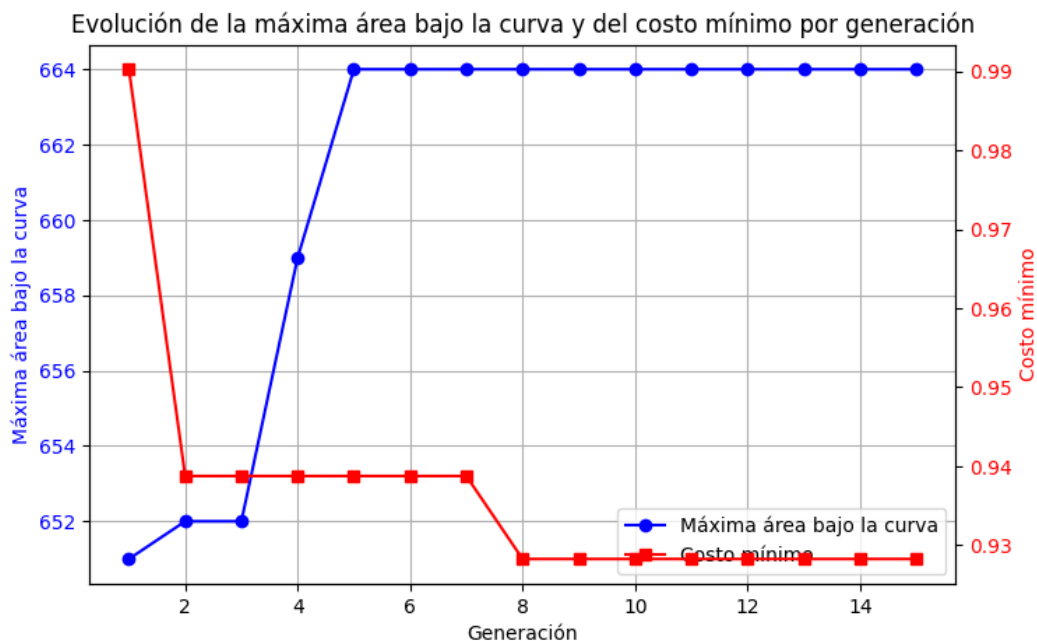


Figura 24. Valores de las funciones objetivos por cada generación para una población inicial de tamaño 75

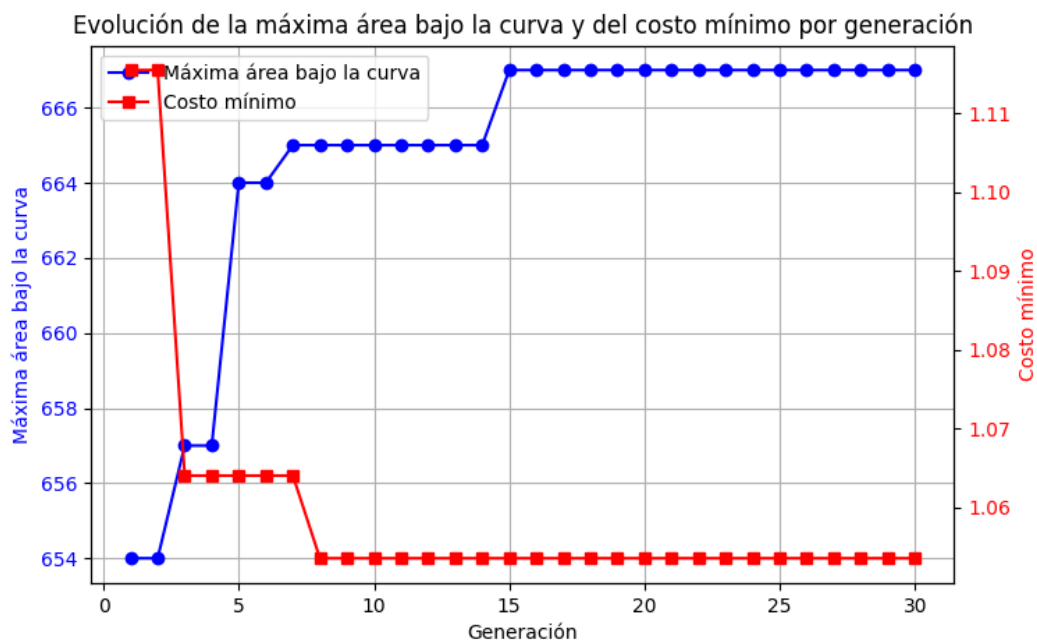


Figura 25. Valores de las funciones objetivos por cada generación para una población inicial de tamaño 100

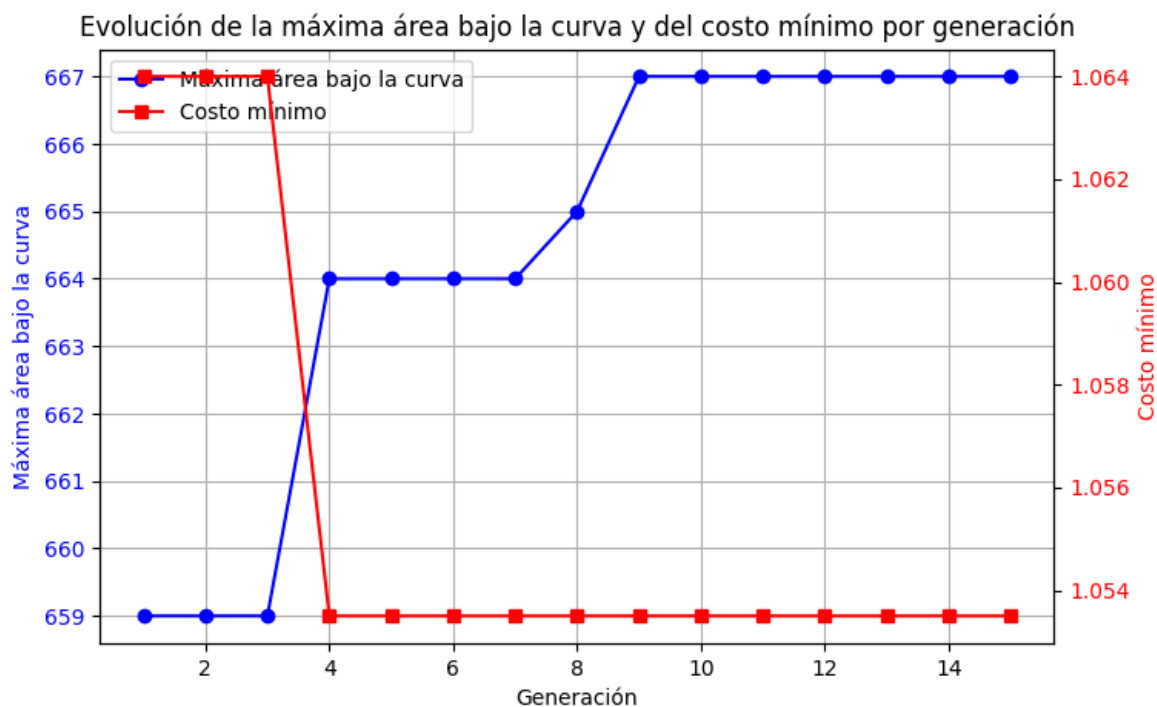


Figura 26. Valores de las funciones objetivos por cada generación para una población inicial de tamaño 200

4.7.10 Integración con priorización

Cuando dos secciones de pavimento distintas presentan la necesidad de ser intervenidas en un mismo año y el presupuesto disponible no permite ejecutar ambas actividades, o bien cuando se requiere definir cuál de ellas debe ser atendida en primer lugar, se aplica un proceso de priorización.

Este proceso evalúa las secciones mediante un sistema de ponderación multicriterio basada en el modelo Analítico Jerárquico considerando criterios de PCI, Factor de Reducción por Rama, Sección Característica y Edad del pavimento cuya importancia para la determinación de la sección que necesita mayor intervención se aprecia en la tabla 16.

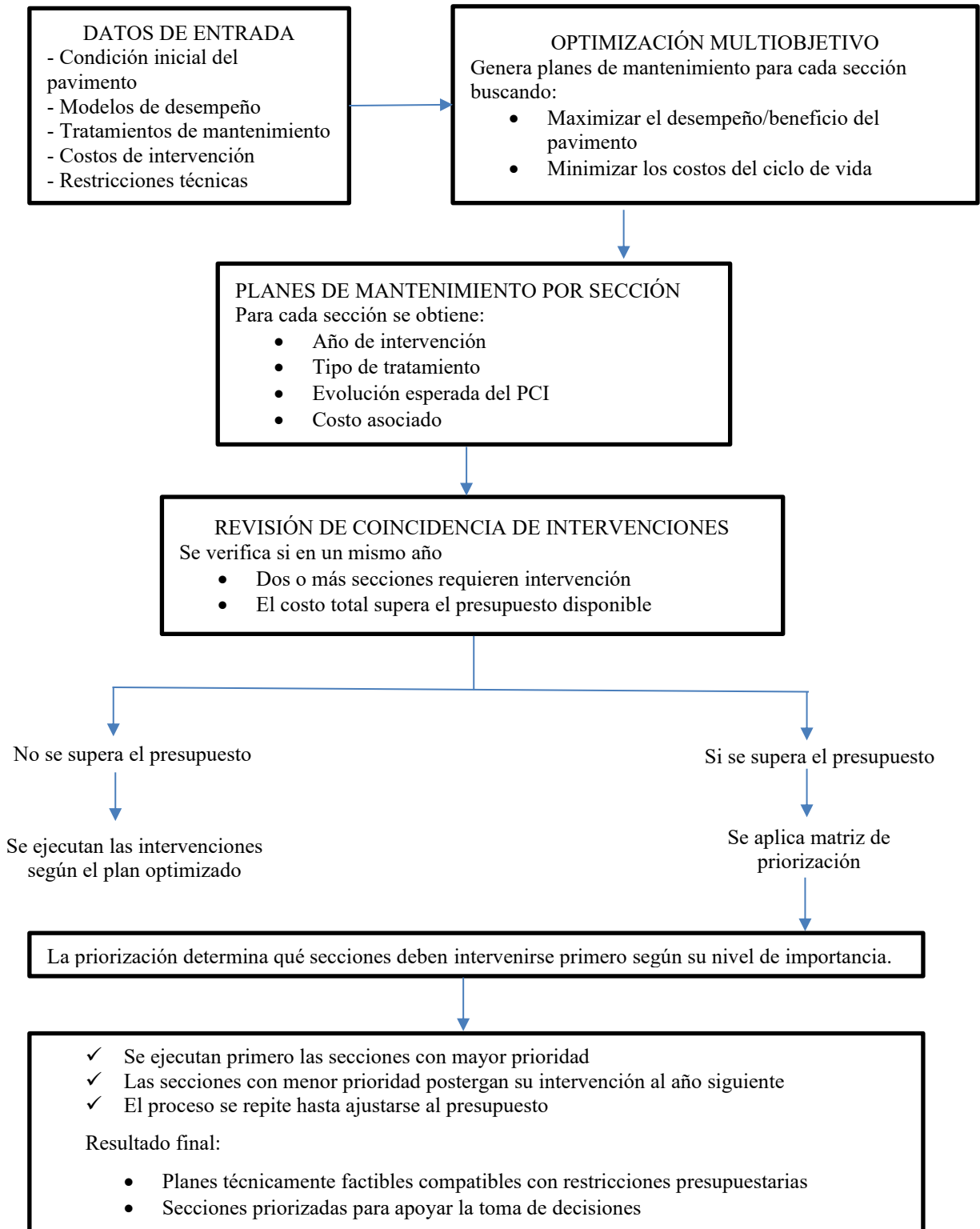
Tabla 16. Ponderación de importancia de criterios de priorización Fuente: (García Claudio, 2025)

Criterio	Ponderación
Índice de condición de pavimentos (PCI)	0.51
Factor de Reducción por Rama.	0.20
Factor de Sección Característica.	0.16
Edad del pavimento sin intervención.	0.13

Una vez obtenidos los porcentajes de priorización, se determina cuál es la sección de mayor importancia. Esta recibe la intervención en el año inicialmente propuesto, mientras que la sección de menor prioridad posterga su intervención al año siguiente, o hasta que la disponibilidad presupuestaria permita su ejecución.

En la figura 27 se presenta un esquema conceptual de la propuesta de metodología que contempla optimización y priorización.

Figura 27. Propuesta de esquema de integración de optimización multiobjetivo y priorización.



4.8 Comparación PAVER y PaveAir

Para el plan de mantenimiento de PI-1 se procederá a compara principalmente costo total de ciclo de vida con los resultados que arrojan los softwares PAVER y PaveAir. Como referencias se tienen los resultados del proyecto FONDEF ID23I10113 “Desarrollo y validación de sistema de gestión de pavimentos aeroportuarios para la red primaria de Chile”.

4.8.1 Resultados Paver

Tabla 17 Valores PCI para PI-1 PAVER

Sección	Año	Costo USD	PCI
PI-1	0	780756	65
PI-1	0	0	100
PI-1	12	611000	69
PI-1	12	0	100
PI-1	19	0	85

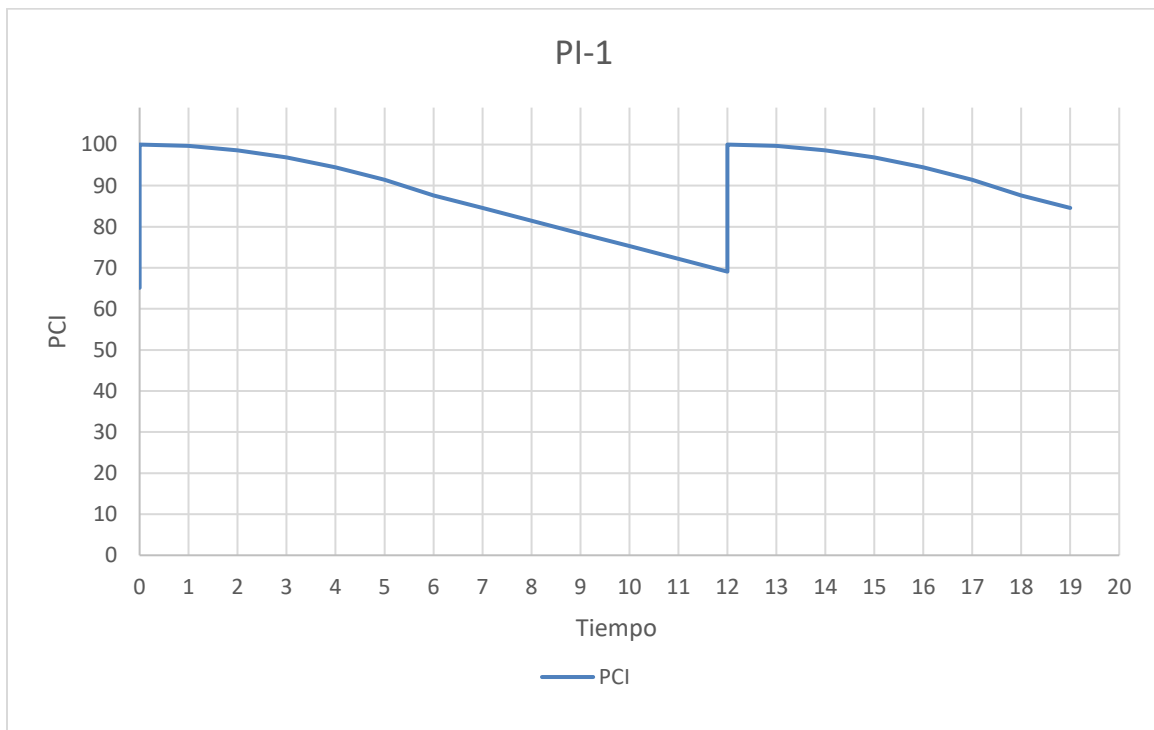


Figura 28 Curva simulación PI-1 PAVER

4.8.2 Resultados PaveAir

Tabla 18 Valores PCI para PI-1 PaveAir

Año	Red	Rama	Sección	Costo	PCI Antes	PCI Después
7/23/2025	La Florida	Pista	PI-1	0	90	90
7/23/2034	La Florida	Pista	PI-1	458916.75	69	100

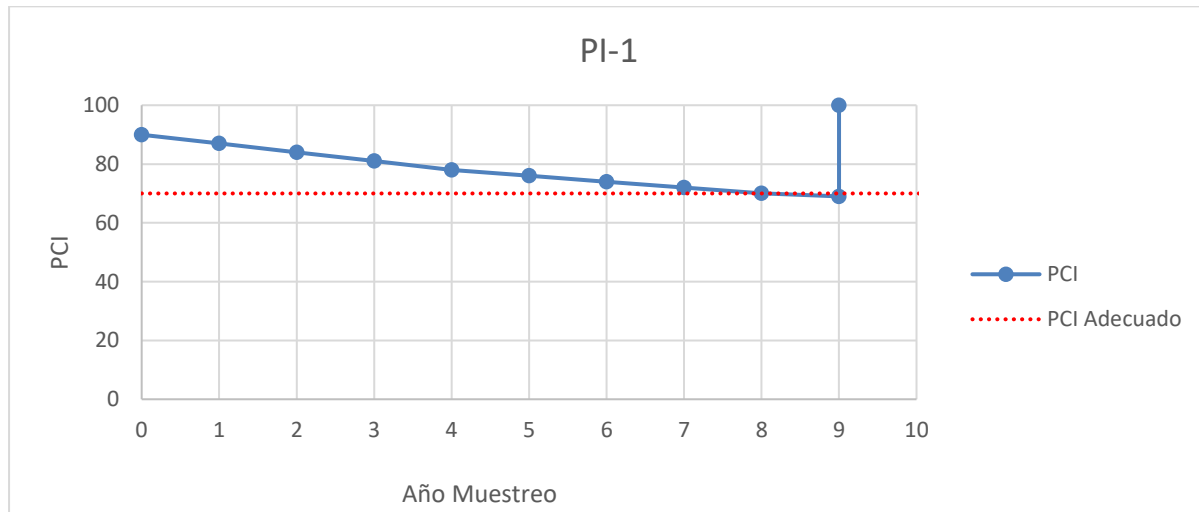


Figura 29 Curva simulación PI-1 PaveAir

4.9 Limitaciones

Como limitaciones de este trabajo, se identifican diversos aspectos que deben ser considerados al interpretar sus resultados. En primer lugar, la información utilizada para caracterizar los tratamientos de conservación, especialmente en lo relativo a su eficiencia, fue obtenida principalmente de documentos y estudios internacionales. En consecuencia, dichos antecedentes podrían no representar con total precisión el comportamiento real de estas intervenciones al ser aplicadas en el contexto aeroportuario chileno.

En segundo lugar, la metodología desarrollada considera únicamente el uso de modelos de desempeño de primera generación. En consecuencia, no incorpora modelos de segunda fase o posteriores, los cuales permiten proyectar el comportamiento del pavimento una vez ejecutada una intervención. Esta limitación reduce la capacidad del modelo para representar de manera más realista la evolución del pavimento a lo largo de su ciclo de vida posterior a la aplicación de actividades de mantenimiento o rehabilitación.

5 Resultados

En la siguiente tabla resumen de las soluciones que responden a los objetivos 1 y 2.

Tabla 19. Resumen del desarrollo de metodología de optimización multiobjetivo

Método seleccionado	Algoritmo genético - NSGA
Parámetros	Parámetros Técnicos: <ul style="list-style-type: none"> • Umbrales de aplicación • efectos de los tratamientos, • modelos de deterioros • Parámetros Económicos Parámetros Económicos: <ul style="list-style-type: none"> • Costo de tratamientos
Tamaño Población Inicial	100 soluciones
N de Generaciones	15

5.1 Aplicación de metodología a Pista PI-1

Aplicando los parámetros mencionados en las secciones 3.2 y 3.3 se procede a aplicar algoritmo de optimización a la sección PI-1.

Para la última generación, el algoritmo entrega las siguientes soluciones:

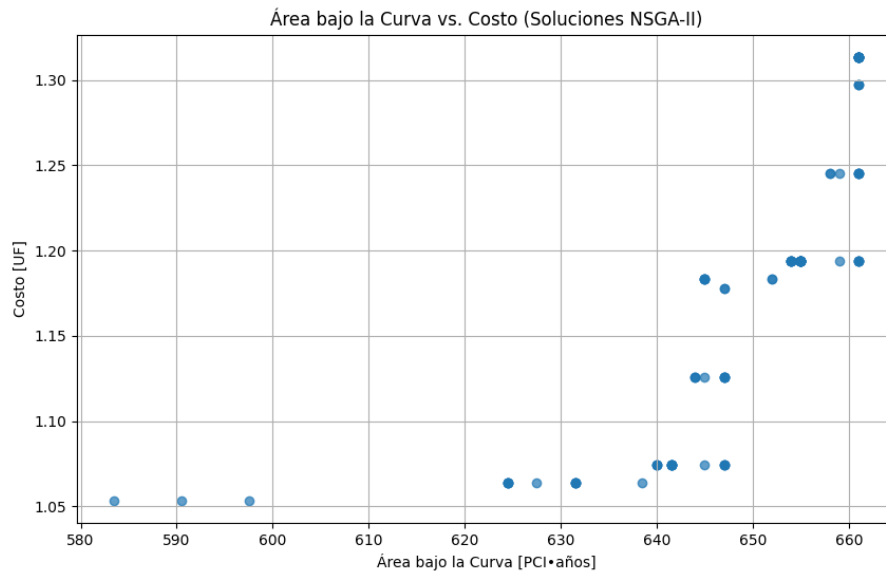


Figura 30. Soluciones en la última generación analizada

Al extraer las soluciones de la frontera de Pareto y aplicar la ecuación 5 se obtiene la mejor solución (BO) además también se extrae la solución más económica (LC). En la tabla 20 se encuentran la información de los planes de mantenimiento y en la tabla 21 los tratamientos que son aplicados para BO.

Tabla 20. Planes de mantenimiento obtenidos para PI-1

	Plan	ABC [PCI * años]	Costo [UF]
BO	0,0,0,3,0,0,1,0,0,4,0,1,0,0,1,0,0,1,0,0	661.00	1.19
LC	0,0,0,1,0,0,0,4,0,0,1,0,0,1,0,0,0,0,0,0	597.50	1.05

Tabla 21. Tratamientos por año de BO

Año	Tratamientos BO
4	Lechada Asfáltica
7	Sellado de grietas
10	Fresado y Recapado
12	Sellado de grietas
15	Sellado de grietas
18	Sellado de grietas

En la figura 31 se observan las curvas obtenidas a partir de los planes BO y LC.

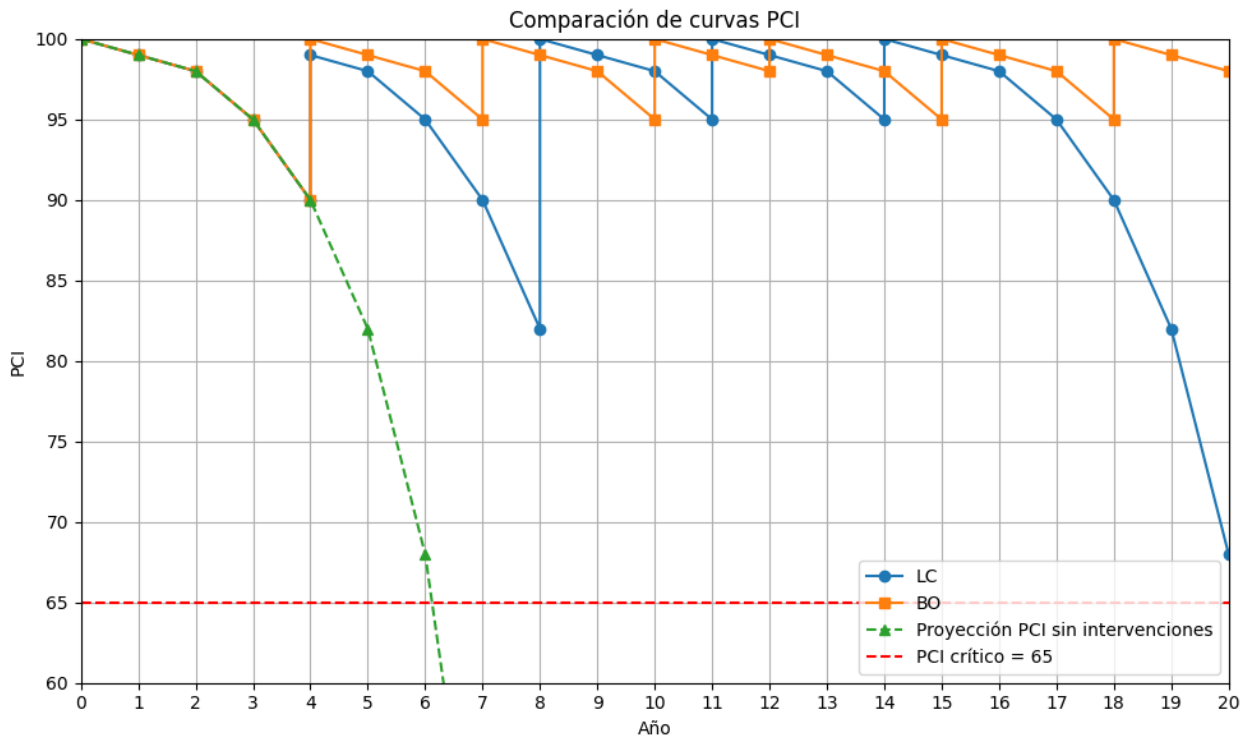


Figura 31. Curvas de los planes obtenidos para LC y BO

El algoritmo trabaja con precios unitarios sin embargo en la práctica se debe trabajar con el costo de la superficie de la unidad muestra o de la sección. La figura 32 muestra de forma gráfica el costo acumulado en el ciclo de vida para la superficie total de PI-1 correspondiente a 26475 m². El plan BO alcanza un total de 31611,15 [UF] mientras que el plan LC alcanza un total de 2789,411[UF].

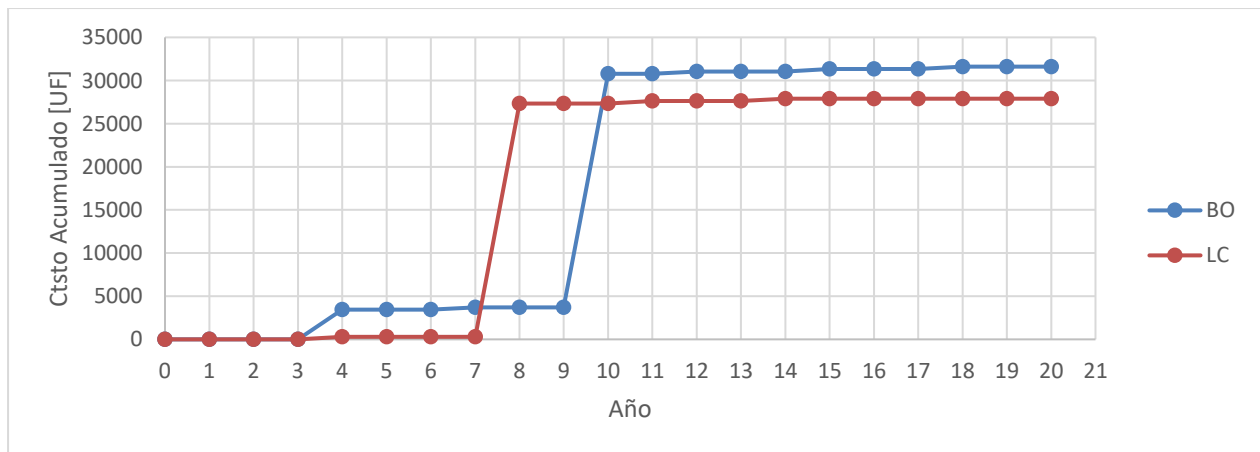


Figura 32. Costos Acumulados de BO y LC

Para complementar el análisis, se aplicó una optimización manual con el fin de simular una estrategia de mantenimiento reactivo. En la Figura 33 se observa que, cuando el pavimento se

aproxima al PCI crítico, se ejecuta la intervención de Fresado y Recapado. En el caso específico de la curva correspondiente a PI-1, esta actividad de conservación mayor se aplica en tres ocasiones a lo largo de su ciclo de vida. Asimismo, en la Figura 34 se presentan los costos acumulados, donde se observa que el mantenimiento reactivo alcanza un costo total de 81172,35 [UF].

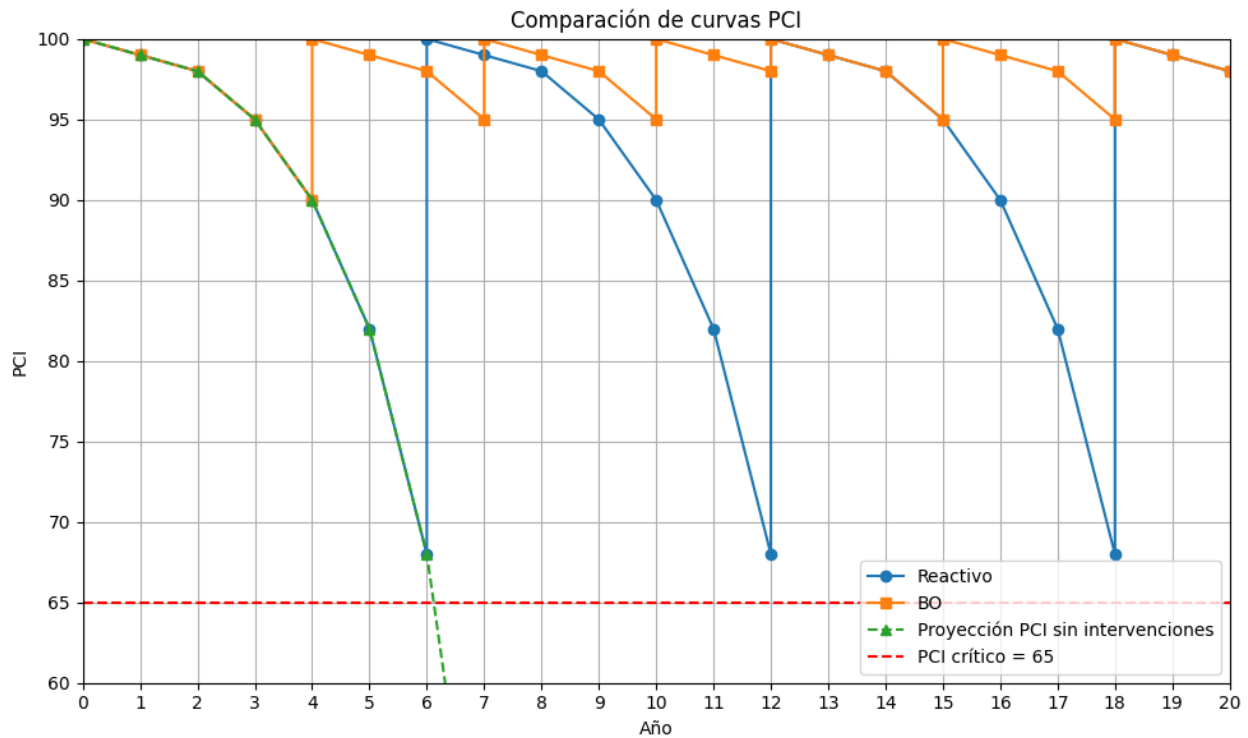


Figura 33. Curvas de los planes obtenidos para LC y plan Reactivo

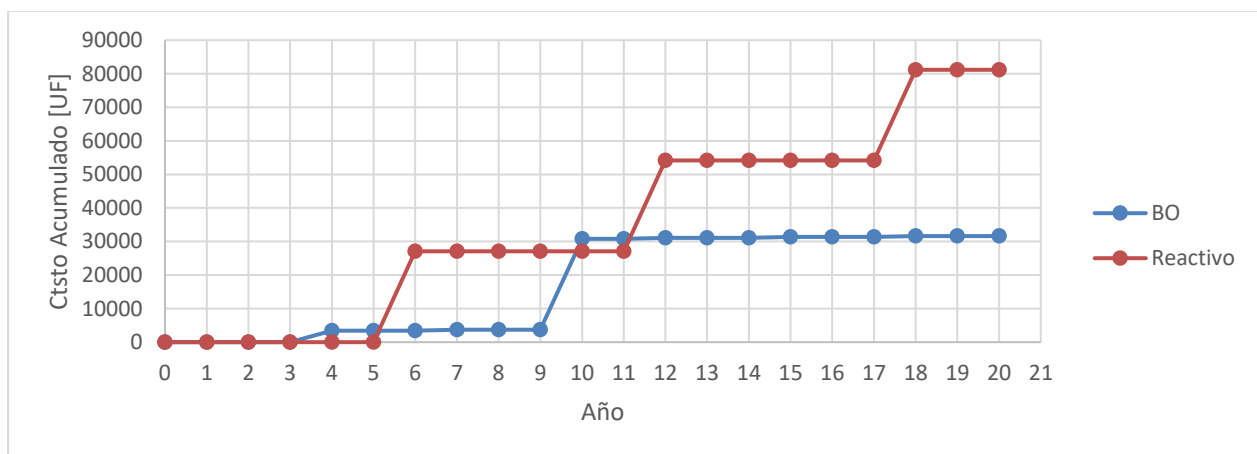


Figura 34. Costos Acumulados de BO y plan Reactivo

5.1.1 Análisis costo ambiental

A partir de los costos ambientales mencionados en la sección 4.4 se procede a calcular el costo ambiental de todo el ciclo de vida de BO, LC y reactivo.

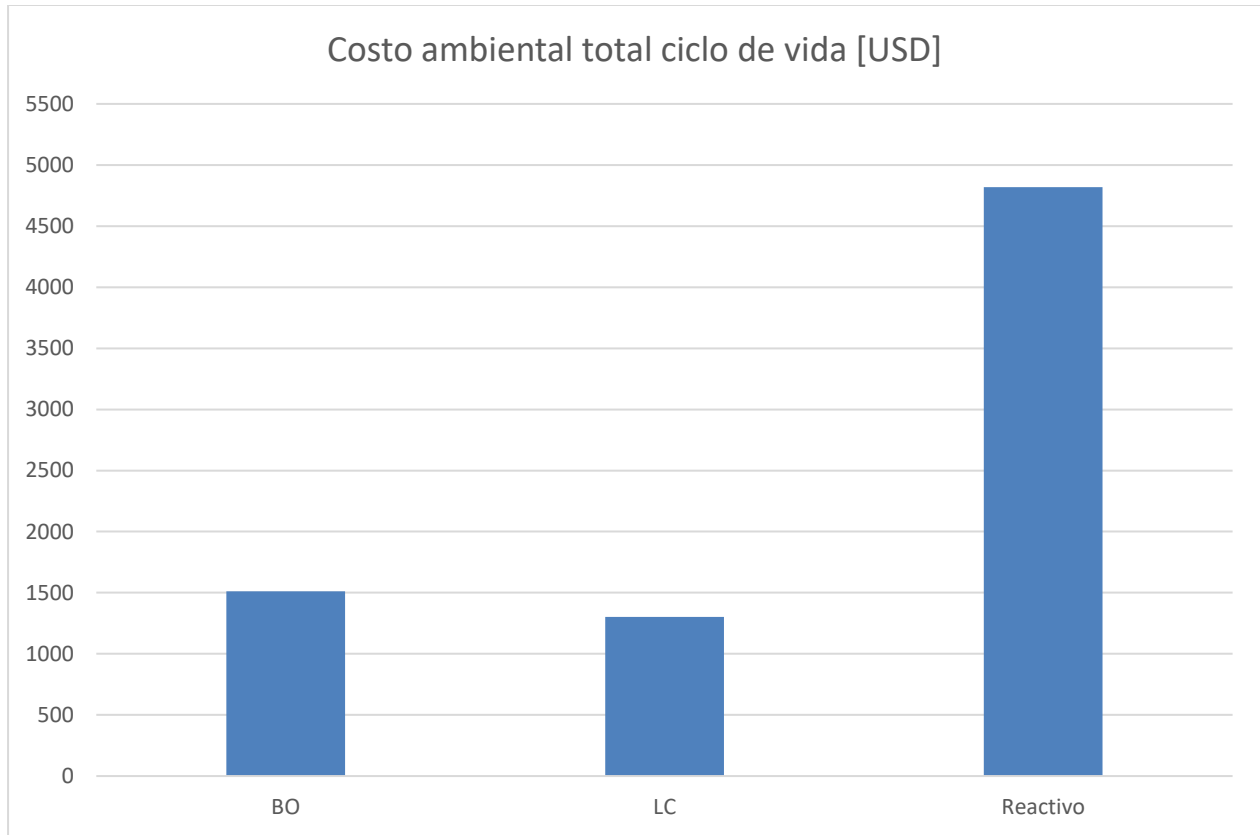


Figura 35. Costo ambiental del total del ciclo de vida de los planes BO, LC y Reactivo

5.1.2 Comparación Paver y PaveAir

A partir de los datos mencionados en la sección 4.8 se proceden a comparar los resultados de Paver y PaveAir con los de algoritmo en las figuras 36, 37 y 38.

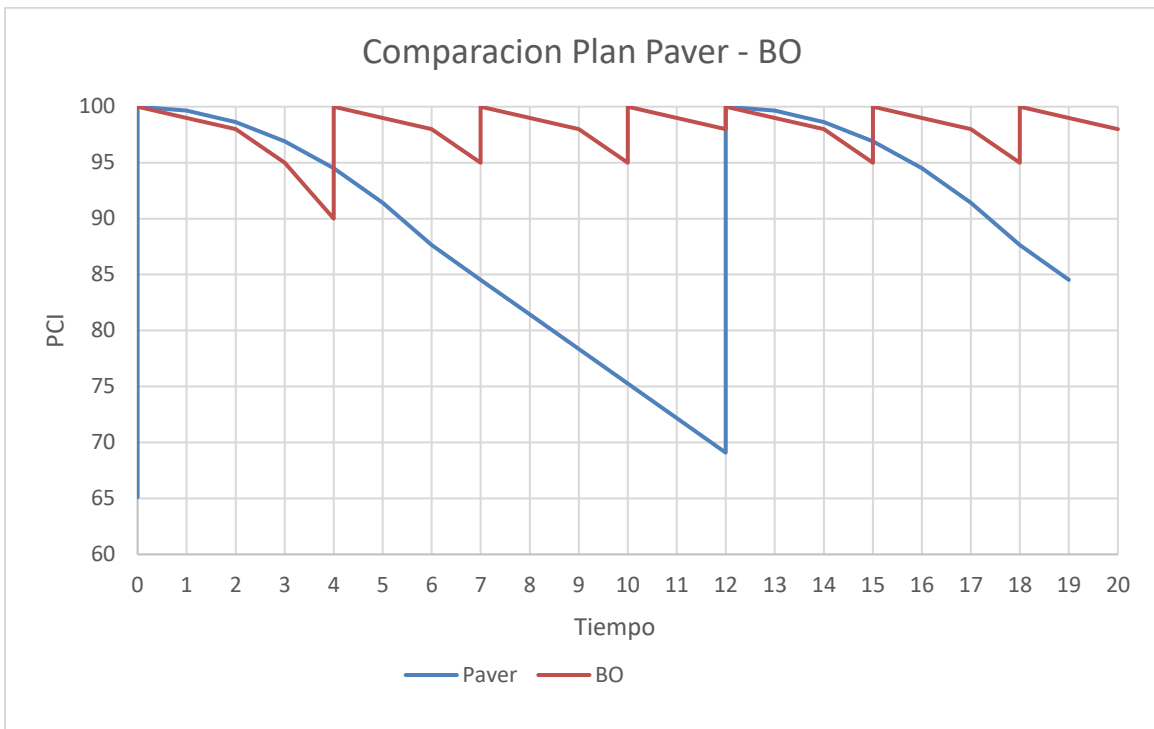


Figura 36. Comparación de PCI Simulación algoritmo - PaveAir, PI-1 Aeródromo La Florida

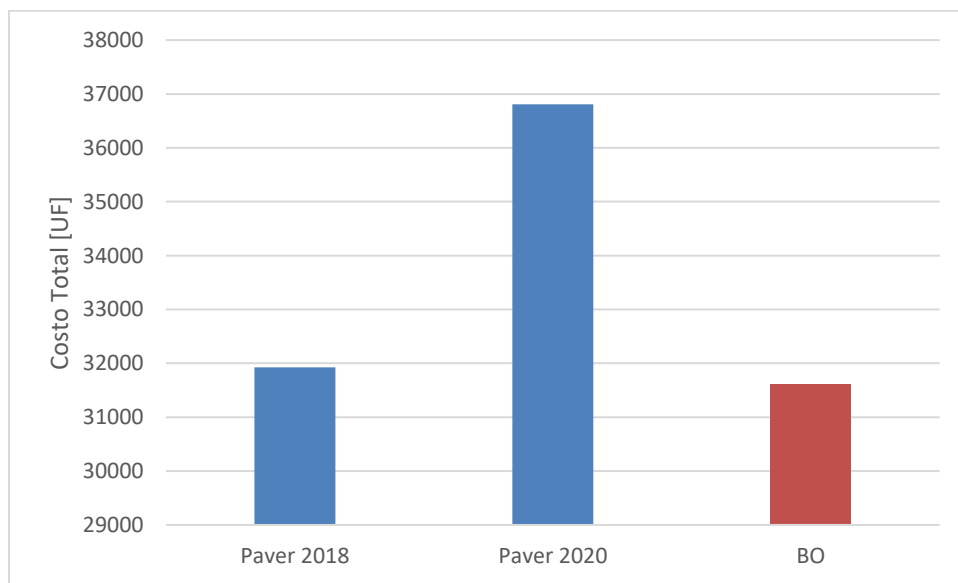


Figura 37. Comparación costos totales algoritmo - PaveAir, PI-1 Aeródromo La Florida

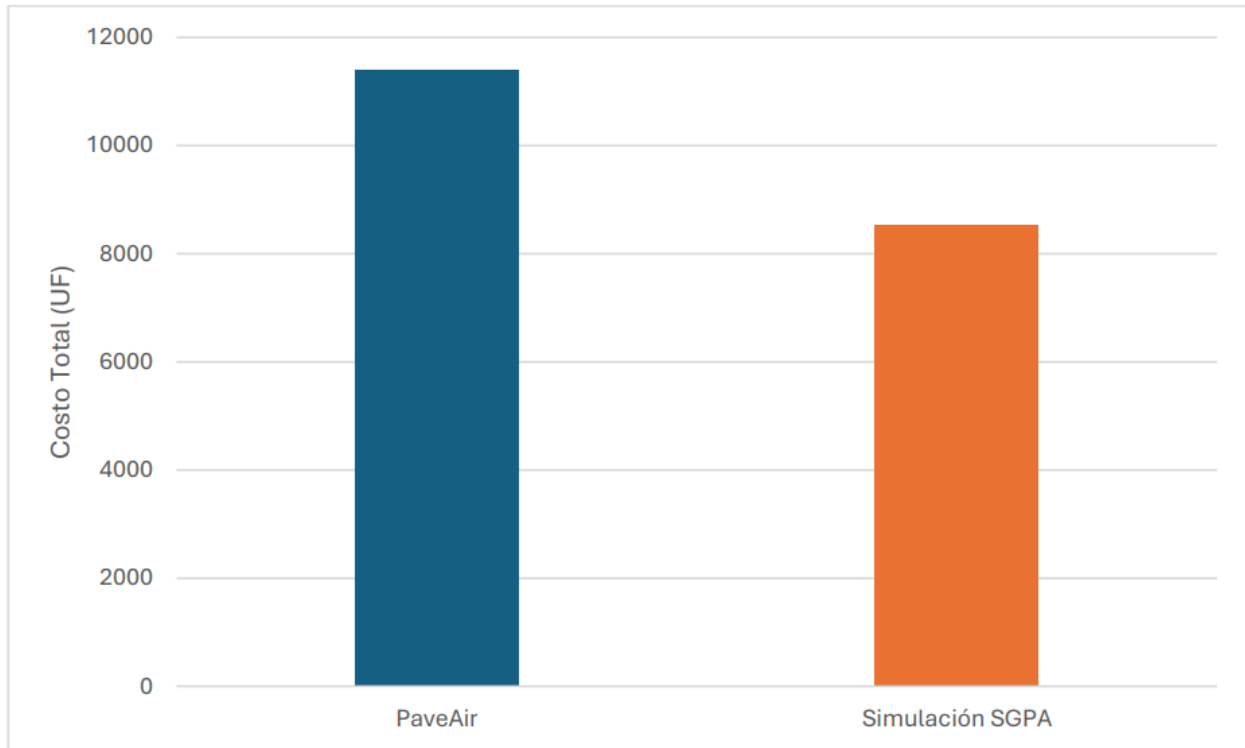


Figura 38. Comparación costos totales algoritmo - PaveAir, PI-1 Aeródromo La Florida

5.2 Resultado Optimización secciones Aeródromo la florida

Siguiendo el mismo procedimiento de la sección 4.1, se procede a realizar una simulación y ejecución del algoritmo de optimización multiobjetivo para cuatro secciones del aeródromo La Florida.

Esta simulación se realizará sobre las secciones PI-1, PI-2, U30-1 y UP12-2. Para ello, la simulación considerará los valores de PCI iniciales indicados en la Sección 3.2.2 y los modelos de deterioros indicados en la sección 3.2.3.

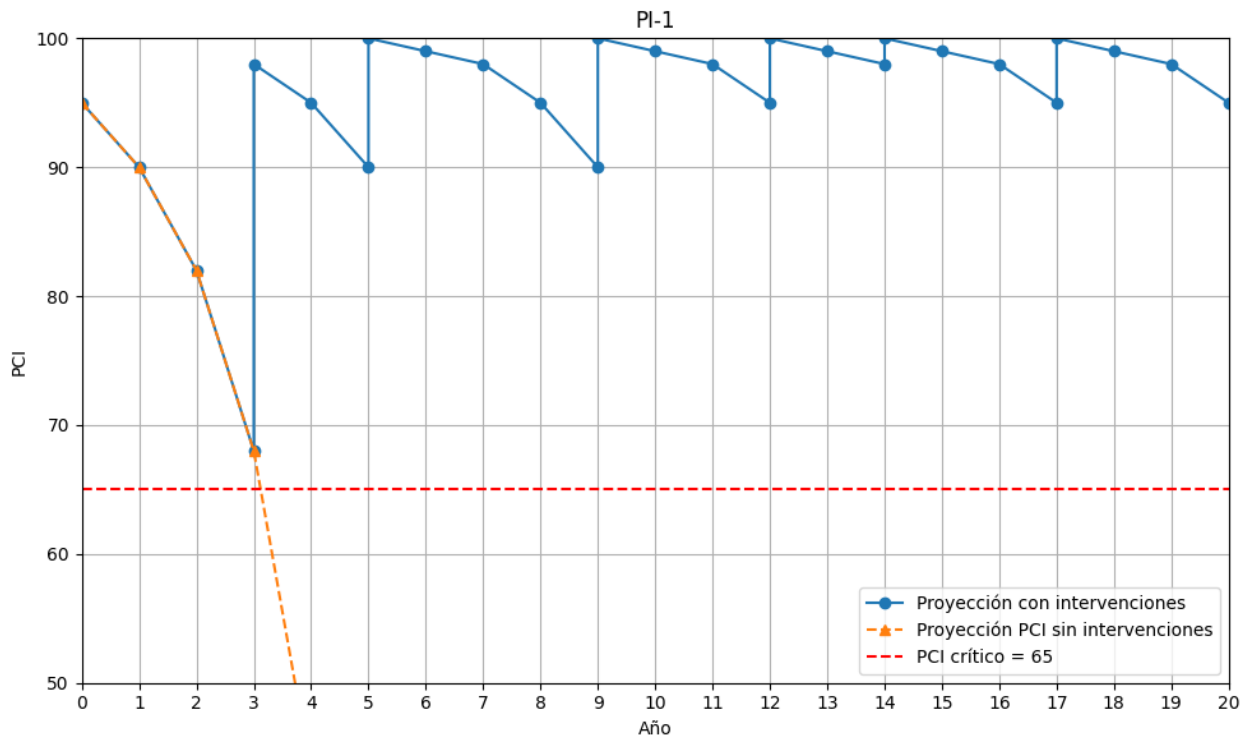


Figura 39. Plan de mantenimiento PI-1

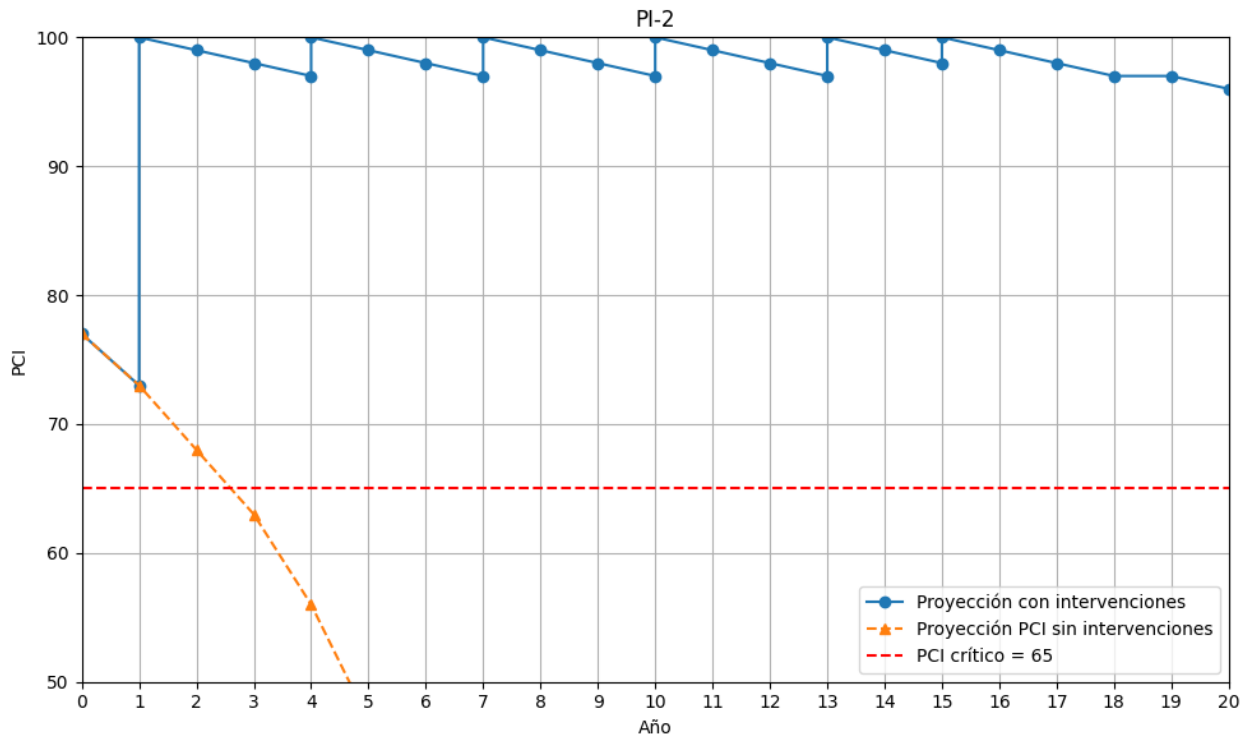


Figura 40. Plan de mantenimiento PI-2

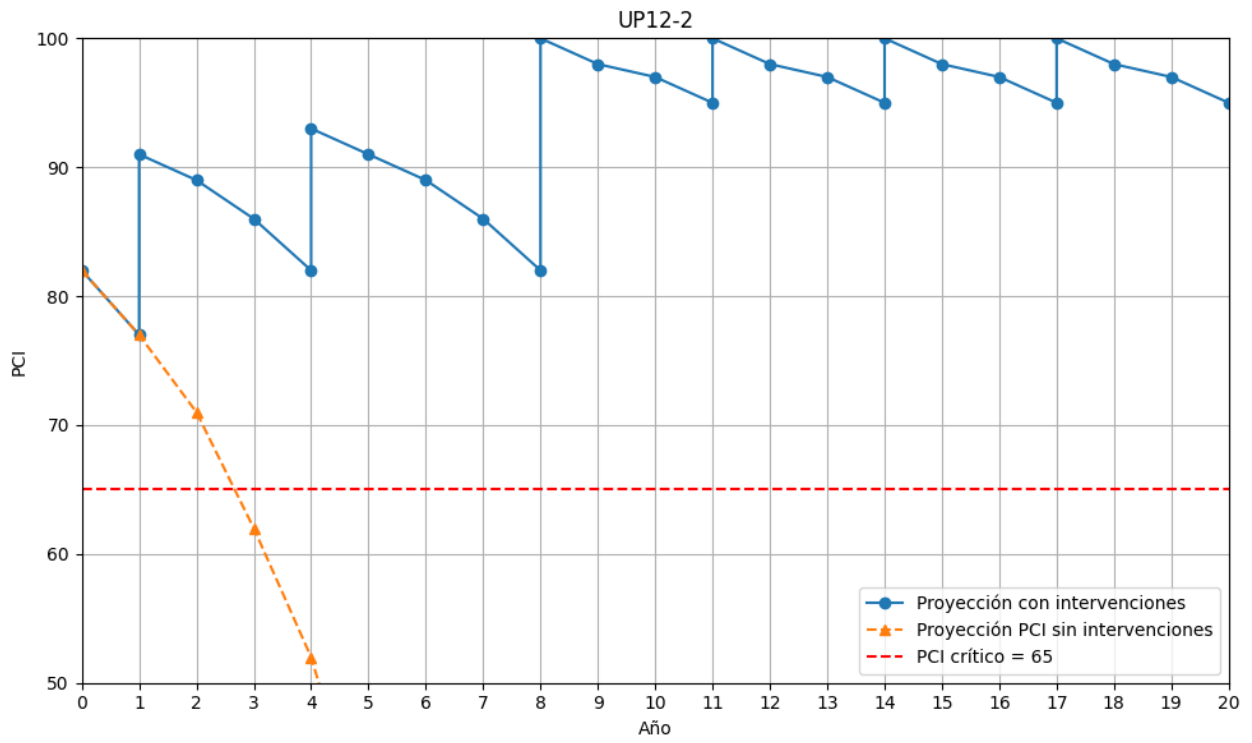


Figura 41. Plan de mantenimiento UP12-1

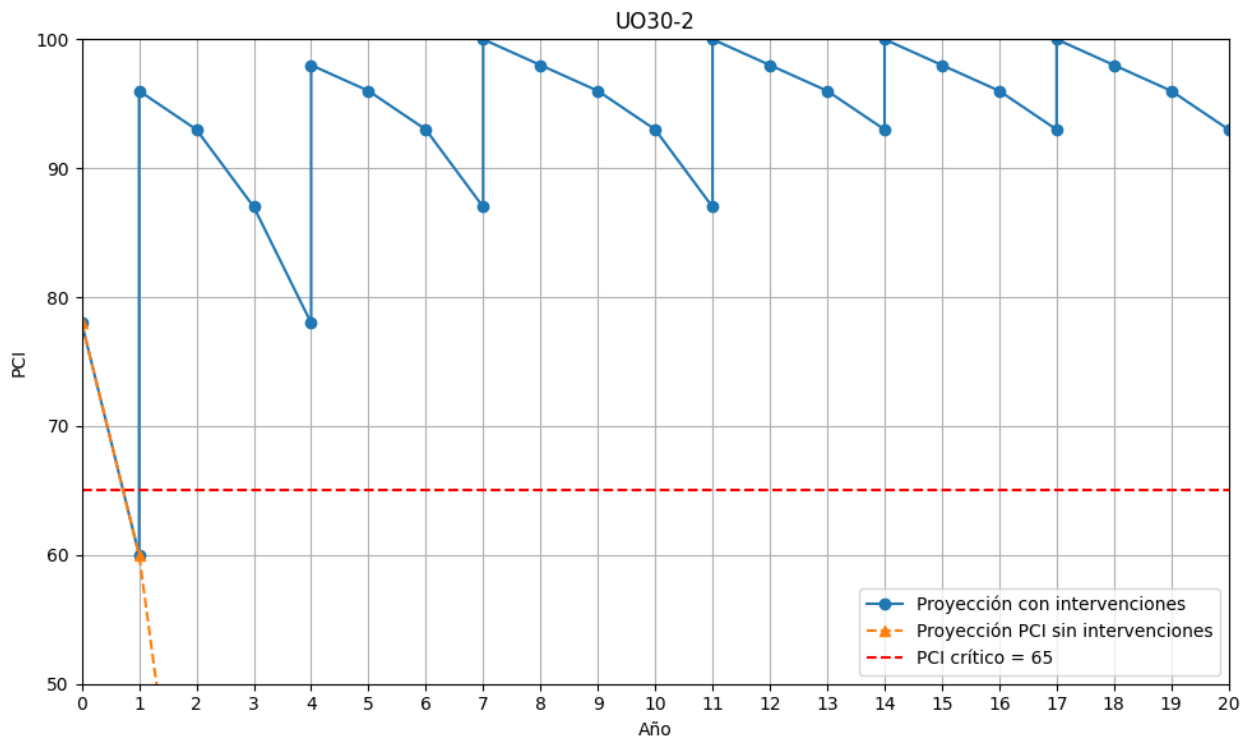


Figura 42. Plan de mantenimiento U30-2

5.3 Resultado Integración con matriz de Priorización

En la práctica no se dispone de recursos ilimitados. Para incorporar esta restricción al análisis, cuando en un año determinado no es posible cumplir con el presupuesto requerido se aplica la matriz de priorización con el fin de definir qué secciones deben ser intervenidas.

Para efectos de este estudio y de la simulación desarrollada en la Sección 4.2, se consideró un presupuesto máximo anual de 54.000 UF que es el valor que corresponde al costo de realizar una conservación mayor en la sección PI-2.

La figura 43 corresponde a los costos de cada año en donde se observa que el primer año se restringe con el presupuesto máximo y además se necesita intervenir, UP12-2 Y U30-1 por lo que se requiere realizar una intervención. Como no se cumple presupuestos se activa la matriz de priorización para decidir que sección tiene se debe intervenir primero, en la tabla figura 44 se observa la matriz de alternativas y el puntaje final de la priorización.

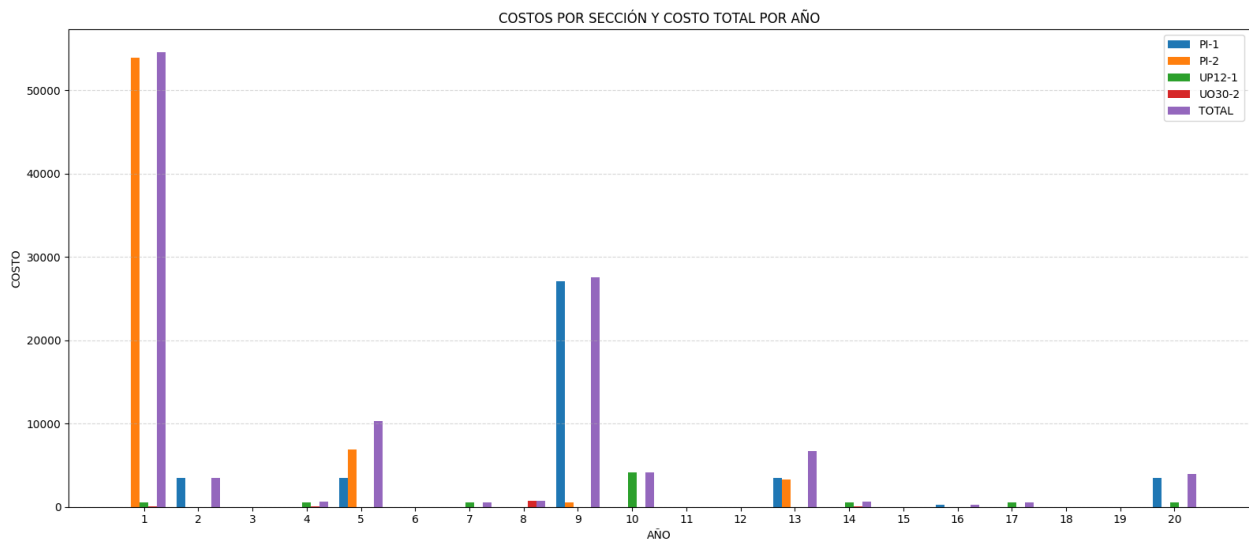


Figura 43. Costos por año de la simulación para secciones del aeródromo de La Florida

```

=====
2. MATRIZ ALTERNATIVAS (Score Normalizado)
=====
ID_Sección    PCI  Despegue  Rama  Sección  Operacional  Seguridad  Crecimiento  Edad
0    PI-1    0.044792  0.25  0.25  0.680000    0.25    0.25    0.25  0.048271
1    PI-2    0.214081  0.25  0.25  0.196667    0.25    0.25    0.25  0.661713
2    UP12-1  0.126359  0.25  0.25  0.061667    0.25    0.25    0.25  0.145008
3    U030-2  0.614769  0.25  0.25  0.061667    0.25    0.25    0.25  0.145008

=====
3. PUNTAJE FINAL
=====
ID    Score
3    U030-2  0.341531
1    PI-2    0.260799
0    PI-1    0.213083
2    UP12-1  0.184586
=====

```

Figura 44. Matriz y puntaje resultante de la priorización

En las figuras 44,45,46,47 se observan las proyecciones de PCI con intervenciones adecuadas y modificadas a partir de los resultados mostrados en la figura 44.

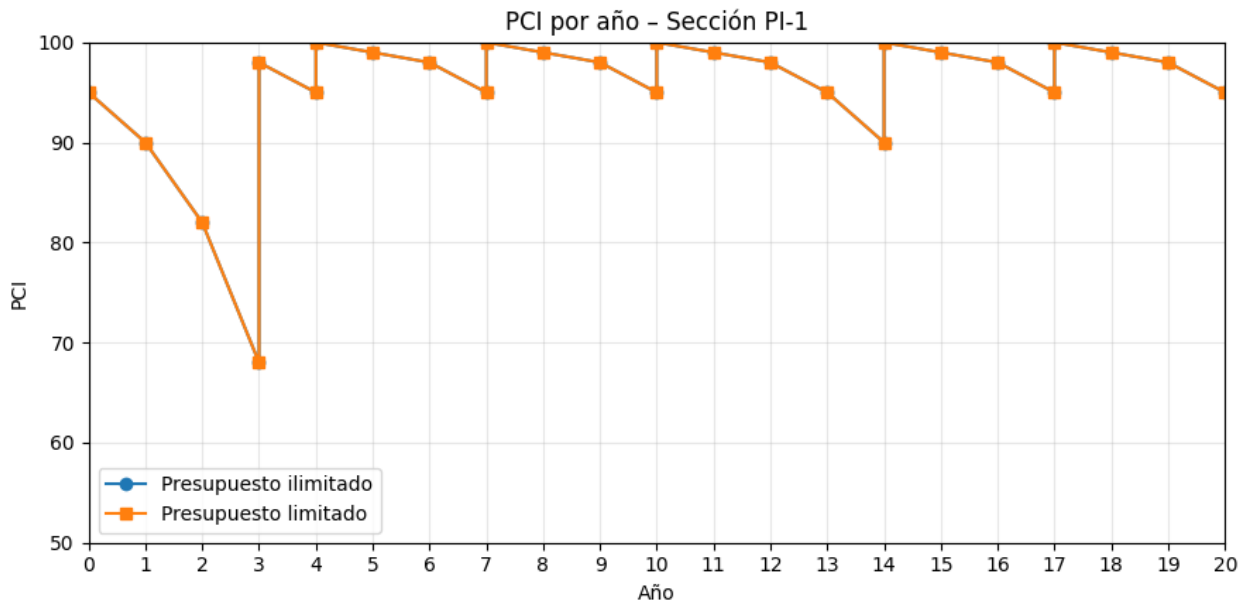


Figura 45. Plan de mantenimiento PI-1 con presupuesto limitado (No presenta Cambios)

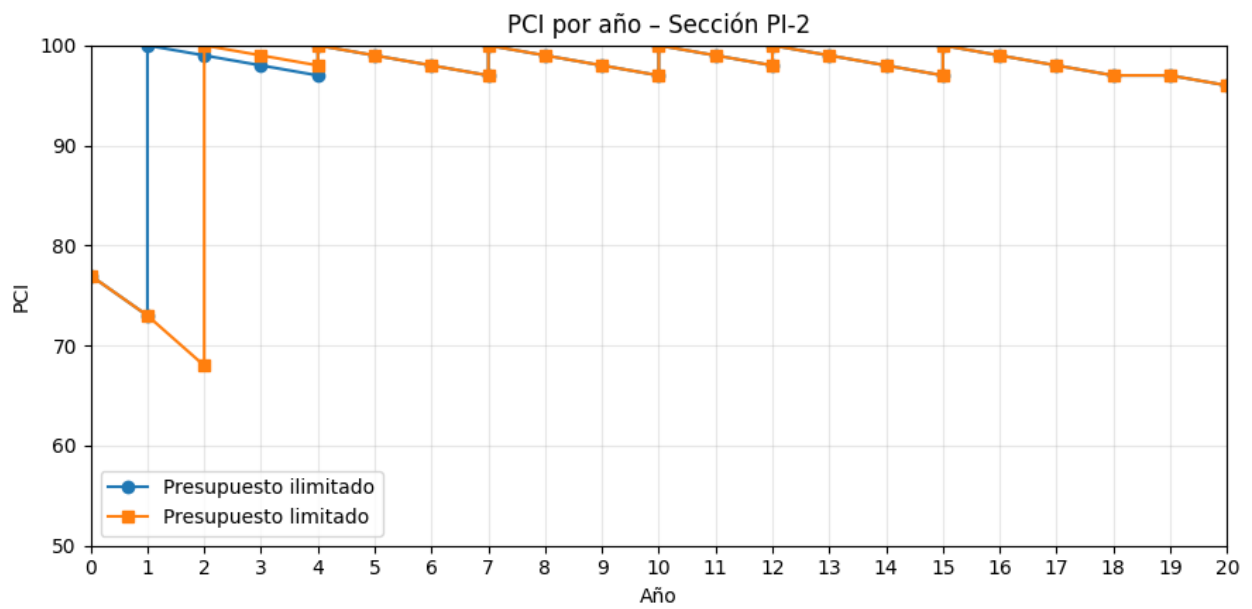


Figura 46. Plan de mantenimiento PI-2 con presupuesto limitado

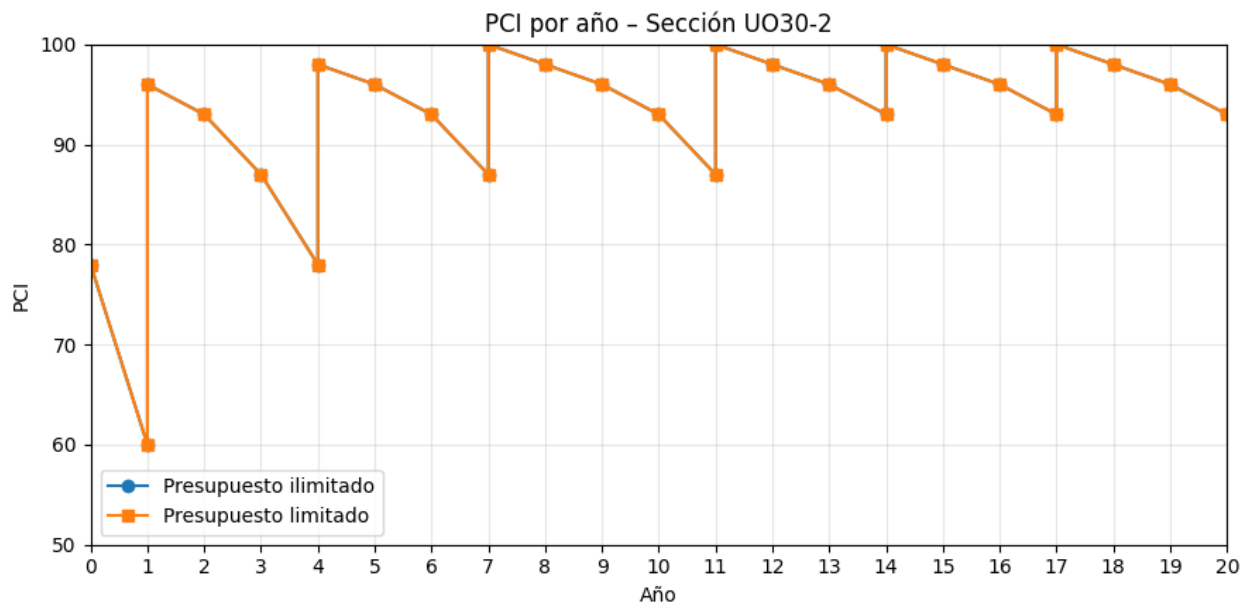


Figura 47. Plan de mantenimiento UO30-2 con presupuesto limitado (No presenta Cambios)

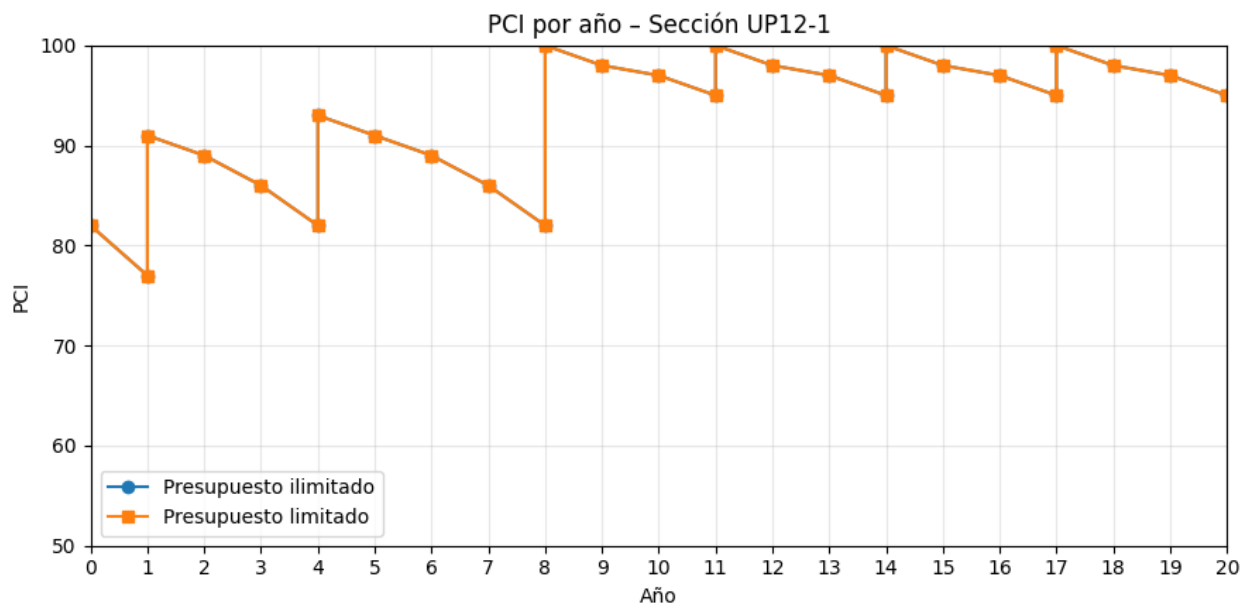


Figura 48 . Plan de mantenimiento UP12-1 con presupuesto limitado (No presenta Cambios)

6 Discusión

Con respecto al desarrollo de la metodología del algoritmo, a partir del análisis de los gráficos presentados en la sección 3.7.9, se determinó que una población de 100 soluciones y 8 generaciones proporciona una calibración adecuada del algoritmo. Lo anterior se fundamenta en que se obtienen mejores resultados en las funciones objetivo que con 25, 50, 75 soluciones en la población. Además, al emplear una población de 200 soluciones, se obtienen resultados similares, pero con un tiempo de análisis y un esfuerzo computacional considerablemente mayores.

Por otro lado, el reducido número de generaciones necesarias también constituye un resultado favorable, ya que implica un menor esfuerzo computacional. Esto podría explicarse por el hecho de que la población inicial no fue generada de manera completamente aleatoria, sino que corresponde a una población asistida, construida a partir de antecedentes proporcionados por la DAP. Entre estos antecedentes destacan criterios relevantes, como la realización de intervenciones cada tres años y la ejecución de una conservación mayor hacia la mitad del ciclo de vida del pavimento. Incorporar estas consideraciones en la generación de las soluciones iniciales permitió orientar la evolución de las poblaciones en las generaciones siguientes y, al mismo tiempo, reducir considerablemente el espacio de búsqueda.

Al momento de ejecutar el algoritmo para la sección PI-1, se observa que la frontera de Pareto entrega soluciones coherentes, donde aquellas con mayor eficiencia, medida en términos de área bajo la curva, también presentan un mayor costo. Con respecto a la mejor solución, en la Figura 25 se aprecia que el plan de mantenimiento resulta satisfactorio, ya que la proyección del PCI se mantiene siempre por sobre 90, condición que puede considerarse muy favorable para la capa de rodadura. Por otra parte, al analizar la solución de menor costo, se observa que, si bien constituye una alternativa razonable, esta alcanza un PCI de 83 en el año 8 y, al final de su vida útil, llega a valores cercanos al PCI crítico. Esta situación podría comprometer la seguridad operacional de la pista.

Al comparar los resultados de la mejor solución obtenida con los de la simulación de un mantenimiento reactivo, en el cual se ejecuta una conservación mayor cada vez que la curva se aproxima al PCI crítico, se observan aspectos bastante relevantes. Al analizar la Figura 27, se aprecia que el área bajo la curva asociada a la mejor solución es considerablemente mayor que la correspondiente al mantenimiento reactivo. Asimismo, al examinar los costos acumulados se tiene que el costo total del ciclo de vida del plan de mantenimiento reactivo supera en un 250% al costo total del plan de mantenimiento asociado a la mejor solución.

En la figura 35 se observa que, pese a que BO es mejor solución que LC, la diferencia del costo ambiental es pequeño, cerca de 250[USD] en el total de los 20 años. Sin embargo, el método reactivo si demuestra tener una gran cantidad de costo ambiental superando los 4500[USD] , incluso triplicando el total del costo ambiental de los otros dos planes.

Al comparar el plan de mantenimiento obtenido mediante el algoritmo con los arrojados por PAVER y PaveAir, se observa diferencias en el costo total del ciclo de vida. En particular, la solución generada por el algoritmo presenta un costo ligeramente menor que la simulación realizada desde el año 2018 y considerablemente menor que la simulación efectuada con PAVER para el año 2020. Para PaveAir el costo total en el ciclo de vida es aproximadamente 2000[UF] más caro que la de la solución generada con la metodología de optimización. Con respecto al área

bajo la curva, se aprecia que las soluciones entregadas por PAVER y PaveAir presentan valores considerablemente inferiores a los obtenidos con la solución generada por el algoritmo.

Con respecto a los planes generados para las secciones PI-1, PI-2, U30-1 y UP12-2, puede señalarse que los resultados son exitosos. A diferencia de lo obtenido en la Sección 4.1, estos nuevos resultados incorporan la condición inicial del pavimento para un año específico, considerando en este caso los datos medidos por FAIC en 2024. Las proyecciones del PCI con intervenciones muestran que, para las cuatro secciones, los valores se mantienen siempre dentro de rangos aceptables a partir del año 1. Sin embargo, al analizar el gráfico de barras presentado en la Figura 30, se observa que durante el primer año se programan intervenciones en más de una sección. Por lo tanto, en un escenario con restricción presupuestaria, dicha planificación podría no ser factible de ejecutar.

Al incorporar una restricción de presupuesto anual, equivalente al costo de ejecutar una conservación mayor en la sección PI-2, no es posible ejecutar todas las intervenciones programadas inicialmente. Al aplicar la matriz de priorización, los gráficos muestran que en el año 1 se ejecutan intervenciones en las secciones UP12-1 y UO30-2, esto cumpliendo con lo que señala el resultado de la priorización en donde se indica que UO30-2 tiene un 34% de preferencia a diferencia de PI-2 que tiene un 26%. Como consecuencia, el fresado y Recapado programado para el año 1 en la sección PI-2 se posterga al año 2.

Al observar los gráficos de la Sección 4.3, se aprecia que los planes de mantenimiento resultan satisfactorios. A pesar de la incorporación de una restricción de presupuesto anual y de las modificaciones efectuadas en los planes originales, estos logran mantener el PCI en valores aceptables en todas las secciones.

Pese a los buenos resultados obtenidos, los planes de mantenimiento propuestos deben entenderse como una herramienta de apoyo únicamente referencial para estimar presupuestos futuros y anticipar el momento en que sería conveniente intervenir las distintas secciones. Sin embargo, ello no implica que, en la práctica, lo proyectado se cumpla en su totalidad. Esta limitación se debe principalmente a la calidad y disponibilidad de los datos utilizados. En particular, los antecedentes relativos al incremento de vida útil asociado a las actividades de mantenimiento no fueron identificados para el contexto nacional por lo que se utilizaron datos de estudios internacionales, por lo que su aplicación puede introducir variaciones en la factibilidad de los planes propuestos. Asimismo, el análisis se desarrolló utilizando únicamente modelos de desempeño de primera fase por lo que también pueden constituir en una fuente de variación en los resultados.

6.1 Contribuciones

En cuanto a las contribuciones a la teoría y al estado del arte, este trabajo puede constituir una base para el desarrollo de futuras metodologías, especialmente aquellas que incorporen herramientas de inteligencia artificial, siempre que se disponga de una base de datos adecuada para el entrenamiento y aplicación de algoritmos inteligentes. En este sentido, la metodología propuesta puede servir como referencia para comparar resultados, evaluar nuevos enfoques y apoyar investigaciones posteriores.

Asimismo, uno de los aportes más relevantes de esta investigación es haber llevado una optimización de carácter secuencial, usualmente aplicada a nivel de sección, hacia una gestión a nivel de red. Esto fue posible gracias a la incorporación de una matriz de priorización, la cual

permite automatizar la toma de decisiones respecto de qué secciones intervenir, considerando explícitamente las restricciones presupuestarias.

Por otro lado, la contribución al estado de la práctica es especialmente relevante, ya que esta herramienta podría transformarse en un apoyo concreto para el personal de las agencias encargadas de gestionar la infraestructura aeroportuaria, facilitando la toma de decisiones y permitiendo, además, proyectar necesidades presupuestarias en el largo plazo. Un aspecto central de este trabajo es su potencial de escalamiento, aunque en esta investigación la aplicación fue simulada para cuatro secciones del aeródromo La Florida, la metodología desarrollada debiese ser capaz de ampliarse progresivamente a un mayor número de secciones y, posteriormente, a distintos recintos de la red aeroportuaria nacional.

Para que dicho escalamiento sea factible, no basta únicamente con la solidez técnica del modelo de optimización, sino que también resulta indispensable abordar ciertas condiciones organizacionales y administrativas. En este sentido, Rodríguez (2026) identifica como desafíos relevantes la ausencia de un historial organizado de las conservaciones, la falta de software de gestión, la persistencia de una lógica reactiva en la toma de decisiones, la reticencia al cambio por parte de los trabajadores y la dificultad de mantener actualizada la información. Estas barreras son especialmente significativas en un proceso de expansión a nivel de red, ya que la efectividad de una herramienta como la propuesta depende directamente de la disponibilidad, trazabilidad y calidad de los datos de entrada, así como de la capacidad institucional para incorporar nuevas tecnologías en sus procesos habituales.

Bajo esta perspectiva, el escalamiento de la metodología a toda la red aeroportuaria debiese realizarse de manera gradual, comenzando con etapas de validación en entornos acotados, para luego avanzar hacia una implementación más amplia. Asimismo, sería necesario fortalecer los procesos de levantamiento y actualización periódica de información, junto con desarrollar capacitaciones, manuales de usuario y material de apoyo que permitan al personal familiarizarse con la herramienta y comprender sus beneficios. De este modo, la metodología no solo aportaría desde el punto de vista técnico al permitir optimizar intervenciones y priorizar secciones bajo restricciones presupuestarias, sino que también constituiría una base para modernizar la gestión de pavimentos aeroportuarios a escala de red, avanzando desde una administración reactiva hacia una planificación más sistemática, preventiva e informada.

7 Conclusiones

En este trabajo se desarrolló una metodología para la generación de planes de mantenimiento y rehabilitación (M&R) de pavimentos aeroportuarios mediante la utilización del algoritmo genético multiobjetivo NSGA II. Para ello, en una primera etapa se realizó una revisión de la literatura especializada sobre sistemas de gestión de pavimentos, con el propósito de identificar cómo investigaciones previas han incorporado herramientas de optimización en la planificación de intervenciones.

Paralelamente, se realizó una búsqueda de información en diversas fuentes, tales como artículos científicos, memorias e información disponible en internet, respecto de los tratamientos aplicados a pavimentos aeroportuarios. No obstante, gran parte de los antecedentes encontrados provenían de fuentes internacionales y presentaban escasa información adaptada al contexto nacional. Debido a ello, el análisis se acotó a cuatro tratamientos de mantenimiento y rehabilitación, los cuales se identificaron en licitaciones de proyectos ejecutados por la Dirección de Aeropuertos (DAP).

Para el caso de estudio, se realizó un levantamiento y recopilación de datos. En particular, para el Aeródromo La Florida se reunió información relativa a las áreas de las secciones, su materialidad, la condición inicial de los pavimentos, entre otros antecedentes relevantes. Asimismo, se extrajeron, a partir de investigaciones previas, modelos de desempeño para las distintas secciones que componen este recinto aeroportuario.

A partir de investigaciones previas, como las desarrolladas por Ansalirari (2019) y Torres-Machi (2014), en base a estos trabajos se elaboró una metodología de optimización multiobjetivo. Esta metodología considera dos objetivos principales: por una parte, maximizar la efectividad del pavimento, representada mediante el área bajo la curva de proyección futura del PCI y, por otra, minimizar los costos totales asociados a las actividades de mantenimiento a lo largo del ciclo de vida del pavimento. Todo ello se encuentra sujeto a distintas restricciones, orientadas a que los planes generados se asemejen a las condiciones observadas en la práctica.

Para iniciar el proceso de optimización, se empleó una población inicial compuesta por planes factibles, construidos a partir de antecedentes recopilados con personal de la Dirección de Aeropuertos. Como resultado, se desarrolló un algoritmo capaz de operar con un número reducido de iteraciones, es decir, con pocas generaciones, y de entregar planes que mejoran progresivamente a medida que avanza la evolución del algoritmo.

La metodología desarrollada incorpora la vinculación del proceso de optimización con una matriz de priorización, la cual permitió, de manera satisfactoria, apoyar la toma de decisiones respecto de qué secciones debían intervenir y cuáles debían postergarse en función de las restricciones existentes. Esta herramienta adquiere especial relevancia en la gestión de pavimentos aeroportuarios, ya que facilita y agiliza la toma de decisiones, particularmente en escenarios donde múltiples secciones requieren intervención simultáneamente y los recursos disponibles son limitados. Además, la incorporación de esta matriz permite trasladar la metodología desde una lógica de análisis a nivel de sección hacia una aplicación a nivel de red, lo que constituye uno de los aportes más importantes del presente trabajo. En efecto, aunque la metodología fue aplicada en este estudio a un conjunto acotado de secciones del aeródromo La Florida, su estructura permite

proyectar su uso hacia un mayor número de secciones y, eventualmente, hacia toda la red aeroportuaria. De esta forma, la propuesta no solo contribuye a optimizar planes de mantenimiento y rehabilitación, sino también a fortalecer una gestión más estratégica, sistemática y escalable de la infraestructura aeroportuaria.

Como recomendación para futuros trabajos, resulta fundamental profundizar en la disponibilidad, calidad y representatividad de los datos utilizados. En particular, sería pertinente desarrollar estudios orientados a evaluar la efectividad de los tratamientos aplicados en pavimentos aeroportuarios, con el fin de conocer con mayor precisión cómo se comporta el incremento del PCI después de una intervención en distintas zonas climáticas de Chile. Esto permitiría contar con antecedentes más ajustados al contexto nacional y, por ende, mejorar la confiabilidad de los análisis. Asimismo, se recomienda incorporar modelos de desempeño de segunda fase, de manera de generar resultados que representen de mejor forma el comportamiento real de los pavimentos a lo largo del tiempo. En conjunto, estos aspectos evidencian que la solidez de futuras metodologías dependerá, en gran medida, de la cantidad y calidad de la información disponible. Disponer de bases de datos más robustas permitirá sustentar de mejor manera la toma de decisiones, reducir la incertidumbre en la planificación y avanzar hacia una gestión de pavimentos aeroportuarios más precisa, eficiente y fundamentada.

8 Agradecimientos

Esta investigación contó con el financiamiento del proyecto FONDEF ID23I10113, ‘Desarrollo y validación de sistema de gestión de pavimentos aeroportuarios para la red primaria de Chile’, al cual se expresa un especial agradecimiento por su valioso apoyo.

9 Referencias

- 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>
- Arabali, P., Sakhaeifar, M. S., Freeman, T. J., Wilson, B. T., & Borowiec, J. D. (2017). Decision-Making Guideline for Preservation of Flexible Pavements in General Aviation Airport Management. *Journal of Transportation Engineering, Part B: Pavements*, 143(2). <https://doi.org/10.1061/jpeodx.0000002>
- Camarena, K. (2018). Implementación de un sistema de gestión de pavimentos para el área de movimiento de aeropuertos. [Universidad Nacional de Ingeniería].
- Chang, C. M. (2020). SISTEMAS DE GESTIÓN DE PAVIMENTOS: PASADO, PRESENTE, Y FUTURO 1. *Accidentes e Infraestructura Civil*, 20(1), 107.
- Chen, W., Yuan, J., & Li, M. (2012). Application of GIS/GPS in Shanghai Airport Pavement Management System. *Procedia Engineering*, 29(1703), 2322–2326. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.01.308>
- Chen, W., & Zheng, M. (2021a). Multi-objective optimization for pavement maintenance and rehabilitation decision-making: A critical review and future directions. *Automation in Construction*, 130, 103840. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2021.103840>
- Chen, W., & Zheng, M. (2021b). Multi-objective optimization for pavement maintenance and rehabilitation decision-making: A critical review and future directions. *Automation in Construction*, 130, 103840. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2021.103840>
- DAP. (2025). *Red Aeroportuaria Nacional | Dirección de Aeropuertos*. <https://aeropuertos.mop.gob.cl/red-aeroportuaria-nacional/>
- De Solminihac T., H., N., T. E., & G., A. C. (2019). GESTIÓN DE INFRAESTRUCTURA VIAL. In *GESTIÓN DE INFRAESTRUCTURA VIAL*. <https://doi.org/10.2307/j.ctvkjb4dw>
- DGAC. (2025). *RED AEROPORTUARIA – DGAC | Dirección General de Aeronáutica Civil*. <https://www.dgac.gob.cl/aeropuertos/red-aeroportuaria-nacional/red-aeroportuaria/>
- Di Graziano, A., Costa, A., & Ragusa, E. (2024). Using an Airport Pavement Management System to Optimize the Influence of Maintenance Alternatives on Operating Conditions. *Applied Sciences 2024, Vol. 14, Page 7158, 14(16)*, 7158. <https://doi.org/10.3390/app14167158>
- Di Mascio, P., & Moretti, L. (2019). Implementation of a pavement management system for maintenance and rehabilitation of airport surfaces. *Case Studies in Construction Materials*, 11(4), e00251. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2019.e00251>
- Elhadidy, A. A., Elbeltagi, E. E., & Ammar, M. A. (2015). Optimum analysis of pavement maintenance using multi-objective genetic algorithms. *HBRC Journal*, 11(1), 107–113. <https://doi.org/10.1016/j.hbrj.2014.02.008>

- FAA. (2003). *GUIDELINES AND PROCEDURES FOR MAINTENANCE OF AIRPORT PAVEMENTS*.
- FAA. (2014). *AC 150/5380-7B - Airport Pavement Management Program (PMP)*. https://www.faa.gov/regulations_policies/advisory_circulars/index.cfm/go/document.information/documentID/1026086
- FAA. (2018). *AC 150/5370-10H, Standard Specifications for Construction of Airports*. <http://www.faa.gov/airports/aip/procurement/>.
- FAIC. (2021). *INFORME DIAGNÓSTICO DE PAVIMENTOS-MÉTODO PCI AEROPUERTO LA FLORIDA LA SERENA*.
- FAIC. (2024). *INFORME DIAGNÓSTICO DE PAVIMENTOS AEROPORTUARIOS MEDIANTE MÉTODO PCI-2024 AERÓDROMO LA FLORIDA, REGIÓN DE COQUIMBO*.
- Fwa, T. F., Chan, W. T., & Hoque, K. Z. (2000). Multiobjective Optimization for Pavement Maintenance Programming. *Journal of Transportation Engineering*, 126(5), 367–374. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-947X\(2000\)126:5\(367\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-947X(2000)126:5(367))
- García Claudio. (2025). *Revisión y actualización de la metodología de priorización para las secciones de la red primaria nacional de aeropuertos*. Universidad Técnica Federico Santa María.
- Giorgi, G., Jiménez, B., & Novo, V. (2023). *Basic Mathematical Programming Theory. International Series in Operations Research & Management Science*, 344. <https://doi.org/10.1007/978-3-031-30324-1>
- Jerry Hajek, Jim W. Hall, & David K. Hein. (2011). Common Airport Pavement Maintenance Practices. *Common Airport Pavement Maintenance Practices*. <https://doi.org/10.17226/14500>
- Salazar Joaquin. (2021). *ANÁLISIS Y COMPARACIÓN DE CRITERIOS UTILIZADOS EN LA TOMA DE DECISIONES PARA LA GESTIÓN DE PAVIMENTOS DE LA RED NACIONAL*. Universidad Técnica Federico Santa Maria.
- Ling, J., Wang, Z., Liu, S., & Tian, Y. (2024). Preventive Maintenance Decision-Making Optimization Method for Airport Runway Composite Pavements. *Applied Sciences* 2024, Vol. 14, Page 3850, 14(9), 3850. <https://doi.org/10.3390/app14093850>
- National Academies of Sciences, E. and Medicine. 2015. (2015). Preventive Maintenance at General Aviation Airports Volume 2: Guidebook. In *Preventive Maintenance at General Aviation Airports Volume 2: Guidebook*. Transportation Research Board. <https://doi.org/10.17226/23435>
- North Dakota Aeronautic Commission. (2024). 2024 Airport Pavement Condition Index Study: Statewide executive summary. In *Suite* (Vol. 201). https://aero.nd.gov/image/cache/2024_ND_Statewide_PCI_Study_Report.pdf?utm_source=chatgpt.com
- Noruzoliaee, M., & Zou, B. (2019). Airfield Infrastructure Management Using Network-Level Optimization and Stochastic Duration Modeling. *Infrastructures* 2019, Vol. 4, Page 2, 4(1), 2. <https://doi.org/10.3390/infrastructures4010002>

- NEOS Guide. (n.d.). *Optimization Problem Types - NEOS Guide*. Retrieved February 28, 2026, from <https://neos-guide.org/guide/types/>
- Pérez, S. (2023). *METODOLOGÍA DE MODELACIÓN DE DESEMPEÑO DE PAVIMENTOS URBANOS CON INTELIGENCIA ARTIFICIAL*.
- Ragusa, E., Costa, A., & Di Graziano, A. (2022). Exploring New Computational Strategies for Managing Maintenance Activities of Airport Pavement Systems. *International Journal of Pavement Research and Technology* 2022 17:1, 17(1), 80–101. <https://doi.org/10.1007/s42947-022-00222-6>
- Roh, S., Lee, J., Urbino, I. J., Lin, W., & Cho, Y. (2023). Airport Pavement Maintenance Decision-Making System with Condition Cases Optimization. *Applied Sciences* 2023, Vol. 13, Page 13167, 13(24), 13167. <https://doi.org/10.3390/app132413167>
- Rosas Sebastián. (2026). *Desarrollo de modelos del desempeño de pavimentos aeroportuarios de la red primaria de Chile en contextos de datos históricos limitados*. Universidad Técnica Federico Santa María.
- Santos, J., Ferreira, A., & Flintsch, G. (2017). A multi-objective optimization-based pavement management decision-support system for enhancing pavement sustainability. *Journal of Cleaner Production*, 164, 1380–1393. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.07.027>
- Shahin, M. Y. (2005). Pavement management for airports, roads, and parking lots: Second edition. *Pavement Management for Airports, Roads, and Parking Lots: Second Edition*, 1–572. <https://doi.org/10.1007/b101538>
- Tolmo, M. B. (2020). Formulación de un marco teórico para la gestión de pavimentos aeroportuarios, aplicable a la red nacional de aeropuertos. [Universidad Técnica Federico Santa María].
- Torres Machí, C. (2015). *Optimización heurística multiobjetivo para la gestión de activos de infraestructuras de transporte terrestre*.
- Torres-Machí, C., Chamorro, A., Pellicer, E., Yepes, V., & Videla, C. (2015). Sustainable pavement management: Integrating economic, technical, and environmental aspects in decision making. *Transportation Research Record*, 2523, 56–63. <https://doi.org/10.3141/2523-07>
- Torres-Machí, C., Chamorro, A., Videla, C., Pellicer, E., & Yepes, V. (2014). An Iterative Approach for the Optimization of Pavement Maintenance Management at the Network Level. *The Scientific World Journal*, 2014, 524329. <https://doi.org/10.1155/2014/524329>
- U.S. Army Corps of Engineers. (2016). *ER 1110-34-1 Engineering and Design TRANSPORTATION SYSTEMS MANDATORY CENTER OF EXPERTISE*.
- Valderrama Daniela. (2025). *Integración criterios sostenibles para un sistema de gestión de pavimentos aeroportuarios para la red primaria de Chile*.
- Vásquez, L., & García, F. (2021). Applied Metaheuristic Optimization in Asphalt Pavement Management. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 31(2), 75–92. <https://doi.org/10.18359/rcin.4371>

A. Anexo: Hoja de registro Pavimentos rigidos

TIPOS DE DETERIOROS EXISTENTES

PAVIMENTO DE ASFALTO / REGISTRO DE INSPECCIÓN – UNIDAD DE MUESTRA (UM)		
AEROPUERTO/AERÓDROMO		FECHA
SECTOR	ZONA CARACTERÍSTICA	ÁREA U.M.
	UM 31	OBSERVACIONES:
INSPECCIÓN REALIZADA POR:		



TIPOS DE DETERIOROS	
41.- Grietas Piel de Cocodrilo	49.- Acción de Solventes
42.- Afloramiento de Asfalto	50.- Bacheos
43.- Grietas en Bloques	51.- Agregados Pulidos
44.- Corrugamiento	52.- Erosión Superficial
45.- Depresiones	53.- Ahuellamiento
46.- Erosión por Chorro JET	54.- Levantamiento en Junturas de Pavimentos
47.- Grietas Reflejadas de Junturas de Pavimento de Hormigón	55.- Falla por Tracción
48.- Grietas Longitudinales y Transversales	56.- Hinchamiento

NIVELES DE SEVERIDAD:

BAJO = B (L)
MEDIO = M (M)
ALTO = A (H)

	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56
	1m ²							60B		1m ²						
								100B		1m ²						
								60B								
								30B								
B (L)																
M (M)																
A (H)																

B. Anexo: Deterioros pavimentos flexibles , extraído de Gidi , 2025

Deterioro (Descripción)	Causas	Opción de reparación
Piel de cocodrilo (grietas interconectadas, que forman polígonos con ángulos agudos)	Repetición de carga de tránsito que provoca una falla por fatiga en la capa de rodadura.	Parqueo para una condición localizada. Recapar o reconstruir para una condición media o alta.
Exudación (película de material bituminoso en la superficie del pavimento)	Exceso de asfalto en la mezcla o un bajo contenido de vacíos de aire.	No se definen niveles de severidad: Aplicar calor, esparcir arena y remover material suelto.
Grieta de bloque (grietas interconectadas que dividen el pavimento en piezas aproximadamente rectangulares)	Contracción del asfalto y variaciones de temperatura. Su aparición implica rigidización del asfalto.	Para una severidad media y alta: sellado de grietas, reciclar la superficie, escarificar en caliente y recapar.
Ondulación (serie de valles y crestas perpendiculares a la dirección del tránsito)	Acción del tráfico combinada con una superficie o base inestable.	Para severidad media y alta: reconstrucción.
Depresiones (superficie tiene elevación ligeramente menor que la zona que la rodea)	Asentamientos del terreno de la fundación o durante construcción.	Para severidad media y alta: Parqueo a profundidad parcial o total.
Erosión por chorro de turbina (áreas oscuras en la superficie)	Ligante bituminoso ha sido quemado o carbonizado.	No se definen niveles de severidad: Aplicar Parqueo de profundidad parcial
Grietas por reflexión de juntas (exclusivo en pavimento de asfalto construidos sobre pavimentos de hormigón)	Movimiento de las losas bajo la superficie asfáltica inducido por temperatura o humedad.	Para severidad baja: Sellar grietas. Para severidad media: sellar grietas, parchar a profundidad parcial. Para severidad alta: Sella grietas, parchar a profundidad total, reconstruir.
Grietas longitudinales/transversales (Las primeras son grietas paralelas al eje de la pista. Las segundas se extienden en ángulos aproximadamente rectos al eje de la pista)	Juntas pobremente construidas, contracción de la superficie del asfalto por cambios de temperatura o endurecimiento del asfalto.	Para severidad baja y media: Sellado de grietas. Para severidad alta: Sellado de grietas y parqueo a profundidad parcial.
Deterioro por derrame de combustible (ablandamiento de la superficie del pavimento)	Derrame de combustible, aceite o solvente hidrocarburo	No tiene niveles de severidad. Parchar a profundidad parcial o total.
Bacheo, reparaciones o parches (área de pavimento)	Parche para reparar el pavimento existente	Para severidad media: Sellado de grietas, reemplazar parche.

que ha sido reemplazada por un parche)		Para severidad alta: Reemplazar parche.
Desprendimiento y efecto de la intemperie (desgaste en la superficie del pavimento)	Desprendimiento de agregados y pérdida de capacidad del ligante asfáltico por endurecimiento	Para severidad alta: Recapar, reciclar, reconstruir.
Ahuellamiento (depresión de la superficie del pavimento en la zona de tránsito de la aeronave)	Deformación permanente en laguna capa del pavimento o en la subrasante por consolidación o desplazamiento de los materiales por las cargas de tráfico	Para severidad media y alta: Parcheo a profundidad parcial o total, recapar.
Grietas por deslizamiento (grietas con forma de medialuna apuntando a la dirección del tráfico)	Frenado de ruedas causa un deslizamiento y deformación de la superficie por baja adherencia entre superficie y la siguiente capa del pavimento	No tiene niveles de severidad. Parcheo a profundidad parcial o total.
Hinchamiento (hinchamiento de la masa en la superficie pavimentada)	Provocado por congelamiento en la subrasante o hinchamiento de los suelos	Para severidad media y alta: Reconstruir.
Agregados pulidos (desgaste de agregados por efecto del tráfico)	Baja porción de agregados sobre el asfalto, falta de rugosidad o partículas angulares del agregado pierden su resistencia al deslizamiento	No tiene niveles de severidad: Recapado, ranurado.

C. Anexo: Deterioros pavimentos rígidos, extraído de Gidi (2025)

Deterioro	Causas	Opción de reparación
Levantamiento de losas por dilatación (cuando no se puede desarrollar libremente la expansión, se produce un movimiento ascendente en los bordes de la losa, con daño cerca de la junta)	Se produce por falta de espacio en juntas cuando hay clima caluroso. Ancho insuficiente de la junta se produce por acumulación de material incomprensible dentro de esta	Para severidad baja, media y alta: Parcheo parcial o total, reemplazo de losas.
Grietas de esquina (grieta que intercepta los bordes de una losa, a una distancia menor o igual a la mitad de la longitud de cada borde, medidos desde la esquina de la losa)	Repeticiones de carga, combinadas con pérdidas de soporte y tensiones de alabeo son causas comunes	Para severidad baja: Sellado de grietas. Para severidad media y alta: Sellado de grietas, parcheo a profundidad, reemplazo de losa.
Grietas longitudinales, transversales y diagonales (grietas que dividen la losa en dos o tres sectores)	Cargas repetidas, tensiones de alabeo y tensiones de fraguado	Para severidad baja y media: Sellar grietas. Para severidad alta: sellar grietas, parcheo a profundidad total, reemplazar losa.
Grietas tipo “D” (se presentan como una configuración de grietas paralelas a la junta de la losa y se acompañan de una coloración oscura a su alrededor)	Incapacidad del hormigón para soportar factores ambientales, como los ciclos de hielo-deshielo	Para severidad media: Parcheo a profundidad total, reconstruir las juntas. Para severidad alta: Reemplazo de losa.
Daño al sello de juntas (cualquier condición capaz de permitir que partículas de suelo o piedras se acumulen en las juntas, o que permita una infiltración de agua)	Desconche del material sellante, extrusión del sello, crecimiento de malezas, oxidación del material sellante, pérdida de adherencia, ausencia o pérdida de material sellante en junta	Para severidad media y alta: Sello de juntas.
Parches menores o iguales a 0.5 m² (área donde el pavimento original ha sido reemplazado por un material de relleno)	Parche para reparar el pavimento existente	Para severidad media y alta: Reemplazar parche.
Parches mayores a 0.5 m² (área donde el pavimento	Parche para reparar el pavimento existente	Para severidad media: Sellar grietas, reparar área

original ha sido reemplazado por un material de relleno)		deteriorada, reemplazar parche. Para severidad alta: Reemplazar parche, reemplazar losa.
Pérdidas repentinas (pequeñas partes del pavimento que se desprenden de la superficie)	Efecto hielo-deshielo con agregados expansivos	No se define nivel de severidad. No es necesario reparar.
Bombeo (expulsión del material arrastrado por el agua, a través de las juntas o grietas causadas por la deflexión de la losa bajo la acción de cargas pesadas)	La expulsión del agua transporta partículas de las capas inferiores, produciendo una pérdida de soporte del pavimento.	No se define nivel de severidad: Sellar grietas y juntas, sellar la base.
Escamaduras, Grietas Tipo Mapeo y Cuarteaduras (red de fisuras que se extienden por la parte superior de la superficie del hormigón en ángulos de 120°)	Excesivo manipuleo del hormigón en la terminación. Aplicación de anticongelantes, ciclos hielo-deshielo. Reacción entre álcalis presentes en cementos	Para severidad media y alta: Reemplazar la losa.
Escalonamiento (diferencia de nivel en la junta o grieta)	Solevamiento o consolidación	Para severidad media: Pulir superficie de la losa. Para severidad alta: Pulir superficie de la losa, reemplazar losa.
Grietas de bloque (grietas interconectadas que rompen la losa en cuatro o más partes)	Sobrecarga, soporte inadecuado	Para severidad baja: Sellar grietas. Para severidad media: Sellar grietas, parchar a profundidad total, reemplazar losa. Para severidad alta: Parchar a profundidad total. Reemplazar losa.
Grietas de retracción (fisuras de poca longitud que no se extienden por toda la losa)	Se forman durante la colocación y curado del hormigón	No se define nivel de severidad. No es necesario reparar.
Desprendimiento de juntas longitudinales y transversales (rotura de los bordes de la losa dentro de	Tensiones excesivas en junta o grieta, causadas por la infiltración de materiales incomprensibles	Para severidad media y alta: Parchar a profundidad parcial.

una distancia de 60 cm respecto de la junta)	o cargas de tráfico. Otra causa en la combinación de hormigón débil y cargas de tráfico	
Desprendimiento de esquina (rotura de la losa dentro de una distancia de 60 cm de su esquina, intercepta las juntas en un ángulo)	Repeticiones de carga, combinadas con pérdidas de soporte y tensiones de alabeo son causas comunes	Para severidad media y alta: Parchar a profundidad parcial.

D. Anexo: Valores predicción PCI PI-1

PI-1	
Tiempo	PCI
0	100
1	99
2	98
3	95
4	90
5	82
6	68
7	43
8	1
9	-74
10	-209
11	-461
12	-958
13	-1993
14	-4332
15	-10222
16	-27523
17	-91668
18	-443437
19	-4776059
20	-1109283989

E. Anexo: Valores predicción PCI PI-2

PI-2	
Tiempo	PCI
0	100.00
1	98.73
2	98.03
3	97.33
4	96.57
5	95.73
6	94.80
7	93.75
8	92.55
9	91.20
10	89.64
11	87.85
12	85.77
13	83.35
14	80.52
15	77.18
16	73.21
17	68.45
18	62.71
19	55.69
20	47.04

F. Anexo: Valores predicción PCI UP12-2

UP12-2	
Tiempo	PCI
0	100
1	98
2	97
3	95
4	93
5	91
6	89
7	86
8	82
9	77
10	71
11	62
12	52
13	37
14	16
15	-13
16	-58
17	-130
18	-254
19	-493
20	-1042

G. Anexo: Valores predicción PCI UO30-2

UO30-2	
Tiempo	PCI
0	100
1	98
2	96
3	93
4	87
5	78
6	60
7	27
8	-45
9	-226
10	-835
11	-4544
12	-340652
13	-340652
14	-340652
15	-340652
16	-340652
17	-340652
18	-340652
19	-340652
20	-340652

H. Anexo: Código para calcular área bajo la curva

```
def Area_BajoLaCurva(valores, limites, PCIcritico):
    area_total = []

    for i in range(len(limites)):

        # Extraer límites
        ini, fin = limites[i]

        # Y: convertir la tupla a array de numpy
        y = np.array(valores[i])

        # Eje X: desde ini hasta fin, paso 1
        # Adjust x to match the actual length of y
        x = np.arange(ini, ini + len(y))

        # Recortar solo valores sobre 65 y restar la base 65
        y_sobre_PCIcritico = np.maximum(y - PCIcritico, 0)

        # Integrar área sobre PCIcritico
        area_sobre_PCIcritico = np.trapezoid(y_sobre_PCIcritico, x)
        area_total.append(area_sobre_PCIcritico)
    area_total_sumada = sum(area_total)

    return area_total_sumada

def
Area(PlanMantenimiento, CurvaPCI, TablaTratamientos, PCIinicial, PCIc
ritico, Horizonte):
    limites=intervalos_Curvas(PlanMantenimiento, Horizonte)
    valorinicial=valor_partida(PCIinicial, CurvaPCI)

    aux = TablaTratamientos.index[-1]
    valores = []

    for i in limites:
        #print(i)
        inicio, fin = i # para mayor claridad

        # Solo hago algo si en ese tramo hay intervención
        #if Plan_de_Mantenimiento[fin - 1] != 0:
        #if aux==4:

        rango = fin - inicio
        #print("rango", rango)
```

```

    if inicio == 0:
        # Caso base: desde el valor inicial dado
        idx_inicio = CurvaPCI[CurvaPCI["valor_pci"] ==
valorinicial].index[0]
        #print("indice inicial", idx_inicio)
        tupla_pci = tuple(CurvaPCI.iloc[idx_inicio : idx_inicio
+ rango + 1]["valor_pci"])
        valores.append(tupla_pci)

    else:
        tratamienaplicado = PlanMantenimiento[inicio-1]
        #print("tratamien aplicado",tratamienaplicado)
        if tratamienaplicado == aux:
            # Buscar donde el valor_pci es 100
            idx_inicio = CurvaPCI[CurvaPCI["valor_pci"] ==
100].index[0]
            #print("indice inicial", idx_inicio)
            tupla_pci = tuple(CurvaPCI.iloc[idx_inicio :
idx_inicio + rango +1]["valor_pci"])
            valores.append(tupla_pci)
        else:

extensionvida=TablaTratamientos.iloc[PlanMantenimiento[inicio-
1]]["Extension de vida (años)"]
        #print("extension de vida",extensionvida)
        ultimoPCI= valores[-1][-1]
        #print("ultimo pci=",ultimoPCI)
        idx_inicio = CurvaPCI[CurvaPCI["valor_pci"] ==
ultimoPCI].index[0]
        #print("indice inicial", idx_inicio)
        if idx_inicio-extensionvida >=0:
            tupla_pci = tuple(CurvaPCI.iloc[idx_inicio-
extensionvida : idx_inicio-extensionvida + rango+1]["valor_pci"])
            valores.append(tupla_pci)
        else:
            idx_inicio = CurvaPCI[CurvaPCI["valor_pci"] ==
100].index[0]
            tupla_pci = tuple(CurvaPCI.iloc[idx_inicio :
idx_inicio + rango +1]["valor_pci"])
            valores.append(tupla_pci)

    if all(x == 0 for x in PlanMantenimiento):
        area=0
    else:
        area=Area_BajoLaCurva(valores,limites,PCIcritico)

```

```

valores2 = [t[1:] for t in valores]
valores3=[v for tupla in valores2 for v in tupla]
listaPCiresultantes=valores3

return valores,limites,area,listaPCiresultantes

```

I. Anexo: Código para calcular Fast Non Dominated Sort

```

def fast_non_dominated_sort(fitness):
    N = len(fitness)

    S = [[] for _ in range(N)]
    n = [0 for _ in range(N)]
    rank = [0 for _ in range(N)]

    frentes = [[]]

    for p in range(N):
        for q in range(N):
            if p == q:
                continue

            if dominates(fitness[p], fitness[q]):
                S[p].append(q)
            elif dominates(fitness[q], fitness[p]):
                n[p] += 1

        if n[p] == 0:
            rank[p] = 0
            frentes[0].append(p)

    i = 0
    while len(frentes[i]) > 0:
        siguiente_frente = []

        for p in frentes[i]:
            for q in S[p]:
                n[q] -= 1
                if n[q] == 0:
                    rank[q] = i + 1
                    siguiente_frente.append(q)

        i += 1
        frentes.append(siguiente_frente)

```

```

if len(frentes[-1]) == 0:
    frentes.pop()

return frentes, rank

```

J. Anexo: Código para Crowding Distance

```

def crowding_distance(frente, fitness):
    if len(frente) == 0:
        return {}

    if len(frente) == 1:
        return {frente[0]: float("inf")}

    if len(frente) == 2:
        return {frente[0]: float("inf"), frente[1]: float("inf")}

    distancia = {i: 0.0 for i in frente}
    n_obj = len(fitness[0])

    for m in range(n_obj):
        frente_ordenado = sorted(frente, key=lambda i:
fitness[i][m])

        f_min = fitness[frente_ordenado[0]][m]
        f_max = fitness[frente_ordenado[-1]][m]

        distancia[frente_ordenado[0]] = float("inf")
        distancia[frente_ordenado[-1]] = float("inf")

        if f_max == f_min:
            continue

        for j in range(1, len(frente_ordenado) - 1):
            anterior = fitness[frente_ordenado[j - 1]][m]
            siguiente = fitness[frente_ordenado[j + 1]][m]

            distancia[frente_ordenado[j]] += (siguiente -
anterior) / (f_max - f_min)

    return distancia

def calcular_crowding_todos(frentes, fitness):
    crowding = [0.0] * len(fitness)

```

```

for frente in frentes:
    dist_frente = crowding_distance(frente, fitness)
    for idx, dist in dist_frente.items():
        crowding[idx] = dist

return crowding

```

K. Anexo: Código para Torneo Binario para seleccionar Padres

```

def better_nsga2(i, j, rank, crowding):
    if rank[i] < rank[j]:
        return i
    elif rank[j] < rank[i]:
        return j
    else:
        if crowding[i] > crowding[j]:
            return i
        elif crowding[j] > crowding[i]:
            return j
        else:
            return random.choice([i, j])

def torneo_binario_nsga2(poblacion, rank, crowding):
    i, j = random.sample(range(len(poblacion)), 2)
    ganador = better_nsga2(i, j, rank, crowding)
    return deepcopy(poblacion[ganador])

```

L. Anexo: Código para realizar cruzamiento

```

def reparar_4_unico_en_posicion_original(hijo, padre_origen,
valor_fijo=4, valor_reemplazo=0):
    hijo_reparado = list(hijo)

    # 1. eliminar todos los 4 del hijo
    for i in range(len(hijo_reparado)):
        if hijo_reparado[i] == valor_fijo:
            hijo_reparado[i] = valor_reemplazo

    # 2. encontrar la posicion original del 4 en el padre

```

```

    posiciones_4 = [i for i, x in enumerate(padre_origen) if x ==
valor_fijo]

    if len(posiciones_4) == 0:
        raise ValueError("El padre_origen no tiene ningun 4")

    if len(posiciones_4) > 1:
        raise ValueError("El padre_origen tiene mas de un 4 y
esta funcion asume solo uno")

    pos_4 = posiciones_4[0]

    # 3. volver a colocar un unico 4 en su posicion original
    hijo_reparado[pos_4] = valor_fijo

    return hijo_reparado
def cruce_1_punto_con_4_unico(padre1, padre2, prob_cruce=1.0):
    padre1 = list(padre1)
    padre2 = list(padre2)

    if len(padre1) != len(padre2):
        raise ValueError("Los padres deben tener el mismo largo")

    if random.random() > prob_cruce:
        hijo1 = deepcopy(padre1)
        hijo2 = deepcopy(padre2)
    else:
        punto = random.randint(1, len(padre1) - 1)

        hijo1 = padre1[:punto] + padre2[punto:]
        hijo2 = padre2[:punto] + padre1[punto:]

        # garantizar un unico 4 en la posicion original
        hijo1 = reparar_4_unico_en_posicion_original(hijo1, padre1,
valor_fijo=4, valor_reemplazo=0)
        hijo2 = reparar_4_unico_en_posicion_original(hijo2, padre2,
valor_fijo=4, valor_reemplazo=0)

    return hijo1, hijo2

def generar_descendencia_con_4_unico(padres, prob_cruce=1.0):
    if len(padres) % 2 != 0:
        raise ValueError("La cantidad de padres debe ser par")

    hijos = []

```

```

for i in range(0, len(padres), 2):
    padre1 = list(padres[i])
    padre2 = list(padres[i + 1])

    hijo1, hijo2 = cruce_1_punto_con_4_unico(padre1, padre2,
prob_cruce)
    hijos.append(hijo1)
    hijos.append(hijo2)

return hijos

```

M. Anexo: Código para realizar mutación

```

def mutacion_hijo_intervenciones_fijas(hijo, prob_mutacion=0.2):
    """
    Muta un hijo respetando estas reglas:
    - Solo puede cambiar genes con valor 1, 2 o 3
    - Nunca cambia 0 ni 4
    - El nuevo valor también debe ser 1, 2 o 3
    - La posición mutada conserva el año de intervención
    """
    hijo_mutado = list(hijo)

    # decidir si muta o no
    if random.random() > prob_mutacion:
        return hijo_mutado

    # posiciones que sí se pueden mutar
    posiciones_mutables = [i for i, x in enumerate(hijo_mutado)
if x in VALORES_MUTABLES]

    # si no hay posiciones mutables, no se hace nada
    if not posiciones_mutables:
        return hijo_mutado

    # elegir una posicion mutable al azar
    pos = random.choice(posiciones_mutables)

    valor_actual = hijo_mutado[pos]

    # posibles nuevos valores, excluyendo el actual
    nuevos_valores = [v for v in VALORES_MUTABLES if v !=
valor_actual]

    hijo_mutado[pos] = random.choice(nuevos_valores)

```

```
    return hijo_mutado

def mutar_poblacion_hijos(hijos, prob_mutacion=0.2):
    hijos_mutados = []

    for hijo in hijos:
        hijo_mutado = mutacion_hijo_intervenciones_fijas(hijo,
        prob_mutacion=prob_mutacion)
        hijos_mutados.append(hijo_mutado)

    return hijos_mutados
```