



UNIVERSIDAD TÉCNICA
FEDERICO SANTA MARÍA

Departamento de Obras Civiles

INTEGRACIÓN CRITERIOS SOSTENIBLES PARA UN SISTEMA DE GESTIÓN DE PAVIMENTOS AEROPORTUARIOS PARA LA RED PRIMARIA DE CHILE

Memoria de Título presentada por

Daniela Ignacia Valderrama Herrera

como requisito parcial para optar al título de la carrera de

Ingeniería Civil

Profesor Guía
Gabriel García y Alelí Osorio

Agosto de 2025



CONSTANCIA DE VALIDACIÓN Y CONFIDENCIALIDAD DE MONOGRAFÍA A REPOSITORIO ACADÉMICO

1.- IDENTIFICACIÓN DEL TRABAJO ACADÉMICO

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

Título del trabajo: INTEGRACIÓN CRITERIOS SOSTENIBLES PARA UN SISTEMA DE GESTIÓN DE PAVIMENTOS AEROPORTUARIOS PARA LA RED PRIMARIA DE CHILE

Nombre del candidato(a): Daniela Valderrama Herrera

Carrera / Grado: Ingeniería Civil

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

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

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

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

3.- EVALUACIÓN DE CONFIDENCIALIDAD POR PROPIEDAD INDUSTRIAL

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

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

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

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

4.- FIRMAS

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

Fecha: 04/09/2025

Firma:

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: 04/09/2025

Firma:

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



UNIVERSIDAD TECNICA
FEDERICO SANTA MARIA

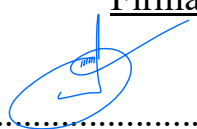
TITULO DE LA TESIS:

**INTEGRACIÓN CRITERIOS SOSTENIBLES PARA UN SISTEMA DE
GESTIÓN DE PAVIMENTOS AEROPORTUARIOS PARA LA RED
PRIMARIA DE CHILE**

AUTOR:

Daniela Ignacia Valderrama Herrera

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

	<u>Nombre</u>	<u>Firma</u>
Prof. Guía	Gabriel García Saá	
Miembro 1 Comisión
Miembro 2 Comisión

Santiago, Chile, Agosto de 2025



Índice

1	Introducción.....	5
1.1	Definición del Problema	6
2	Objetivos	6
2.1	Objetivo General.....	6
2.2	Objetivos Específicos.....	7
3	Metodología de Trabajo	7
4	Marco teórico	8
4.1	Sistema de gestión de pavimentos (SGP)	8
4.2	Red Aeroportuaria en Chile	9
4.3	Tratamientos y Mantenimientos.....	10
4.3.1	Deterioros	10
4.3.2	Mantenimientos	14
4.4	Contexto Chileno	15
4.5	Criterios Sostenibles.	16
4.5.1	Criterios Medioambientales.....	16
4.6	Ejemplos de aplicación de criterios ambientales para M&R de pavimentos aeroportuarios	18
4.7	Métodos Comparativos de Impactos Ambientales.....	19
4.7.1	Costos-beneficios Monetarios de Impactos Medioambientales.....	19
4.7.2	Índice Medioambiental	21
5	Metodología.....	23
5.1	Propuesta de Cuantificación de Parámetros Medioambientales	23
5.1.1	PaLATE.....	26
5.2	Propuesta Criterio Ambiental.....	29
5.2.1	Índice EAR Simplificado.....	29
5.2.2	Comparación de Alternativas	30
5.3	Resumen Propuesta Criterio Medio Ambiental	32
6	Caso de Estudio: Aeropuerto de La Florida	33
6.1	Estimación de Volúmenes.....	34
6.2	Estimación de Parámetros Ambientales.....	35
6.3	Costos monetarios	40
6.3.1	Análisis del aumento relativo del Precio Social del Carbono (PSC).....	43
7	Conclusiones y recomendaciones.....	46
7.1	Conclusiones.....	46
7.2	Recomendaciones	47
8	Referencias	48
A.	Apéndice 1 Herramientas de estimación de impactos ambientales.....	51



B.	Apéndice 2 Propuesta metodológica para incorporar el criterio ambiental.....	52
A.	<i>Estimación de volúmenes de materiales</i>	52
1.	Identificar el tipo de tratamiento a analizar.....	52
2.	Identificar los materiales involucrados en el mantenimiento.	52
B.	<i>Estimación de parámetros ambientales</i>	53
1.	Descargar herramienta PaLATE.....	53
2.	Ingreso de datos estructurales en PaLATE.....	53
3.	Ingreso de datos de materiales, procesos y desechos	53
4.	Revisión de resultados en PaLATE.....	54
C.	<i>Cálculo monetario de emisiones de CO₂</i>	54
1.	Cálculo monetario de emisiones de CO ₂	54
D.	Apéndice 3 Datos Caso Aeropuerto La Florida	54
E.	Apéndice 4 Estimación de parámetros ambientales	56



UNIVERSIDAD TÉCNICA
FEDERICO SANTA MARÍA

INTEGRACIÓN CRITERIOS SOSTENIBLES PARA UN SISTEMA DE GESTIÓN DE PAVIMENTOS AEROPORTUARIOS PARA LA RED PRIMARIA DE CHILE

Daniela Valderrama Herrera, Alelí Osorio Lird, Gabriel García Saá

Universidad Técnica Federico Santa María

Resumen

Actualmente, la sostenibilidad ha adquirido importancia en la gestión de infraestructura. En este contexto, la presente investigación propone la incorporación de un criterio ambiental en un Sistema de Gestión de Pavimentos Aeroportuarios (SGPA) aplicado a la red primaria de Chile. La propuesta es ejemplificada mediante su aplicación al aeropuerto La Florida. Se plantea el uso del software PaLATE como herramienta para estimar los impactos ambientales de distintas actividades de mantenimiento y rehabilitación (M&R), considerando estos resultados como valores de referencia para apoyar la toma de decisiones. De igual forma, se propone una metodología para incorporar este criterio en la etapa de optimización del SGPA, a través de la valorización monetaria de las emisiones de CO₂ mediante el Precio Social del Carbono (PSC). La metodología propuesta permite su aplicabilidad por la Dirección de Aeropuertos (DAP), facilitando la integración del criterio ambiental en la toma de decisiones. La implementación de este enfoque puede fortalecer los procesos de planificación de la DAP, avanzando hacia una gestión de pavimentos aeroportuarios más coherente con los compromisos de sostenibilidad y descarbonización establecidos a nivel nacional.

Palabras claves: Sistema de Gestión de Pavimentos, Sostenibilidad, Emisiones, Precio Social del Carbono, Aeropuerto

1 Introducción

El transporte aéreo se ha convertido en un importante impulsor económico, generando un notable impacto en el desarrollo de los países al incrementar la conectividad y convirtiéndose en un factor crucial para beneficiar distintas áreas como el turismo, la economía, la cultura y la innovación. Consecuentemente, el crecimiento de este medio de transporte ha conllevado un aumento significativo del tráfico en aeropuertos, aeródromos y helipuertos en todo el mundo, además de una expansión de la infraestructura asociada a este medio de transporte, lo que representa un desafío en la gestión de estos activos. Este incremento en la actividad aérea y en la infraestructura aeroportuaria ha dado lugar a una creciente preocupación por el impacto ambiental, social, económico y político asociado a dichos procesos (Wiltshire & Jaimurzina, 2017).

En Chile, la red aeroportuaria es administrada por la Dirección de Aeropuertos (DAP), que está a cargo de 319 recintos distribuidos a lo largo del país, facilitando la conectividad tanto nacional como internacional. Esta red se divide en cuatro categorías: red primaria, red secundaria, pequeños aeródromos y aeródromos militares. La red primaria incluye 17 aeródromos y aeropuertos de mayor relevancia para el país, la red secundaria y los pequeños aeródromos operan como enlace entre algunas zonas del país y la red primaria, mientras que los aeródromos militares son de uso exclusivamente militar (DGAC, 2019). La DAP es responsable de gestionar los activos asociados a la red aeroportuaria, empleando herramientas de apoyo a la toma de decisiones relacionadas con los pavimentos aeroportuarios; sin embargo, estas no se utilizan de forma integrada y se enfocan únicamente en criterios económicos y técnicos (Tolmo, 2020), dejando de lado criterios ambientales y sociales que son fundamentales para promover un desarrollo sostenible.



En los últimos años, se le ha otorgado una gran importancia al cambio climático, a la gestión de recursos, a la conservación de la biodiversidad y a los efectos que tienen las acciones humanas en el medio ambiente a nivel mundial, como parte de buscar un desarrollo más sostenible y asegurar a las futuras generaciones poder satisfacer sus necesidades. Chile no es la excepción: ha promovido políticas y compromisos para buscar un desarrollo más sostenible del país, adhiriéndose a los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) propuestos por las Naciones Unidas (MDSF, 2023). Además, el país ha establecido el objetivo de cero emisiones netas de CO_2 en el área de transporte aéreo, específicamente haciendo referencia al uso de combustible para aviones (Arteaga et al., 2024), lo que ha llevado a las instituciones públicas y privadas a promover una gestión más sostenible de sus procesos.

El sector de la construcción, como actividad, tiene un impacto significativo en el medioambiente (Vivian W. Y. Tam & Khoa N. Le, 2009). En el caso de la red aeroportuaria chilena, la construcción y mantenimiento de pavimentos de pistas, calles de rodaje y plataformas se realizan sin considerar de manera adecuada los efectos ambientales de estas actividades (Tolmo, 2020).

Es por esto que, como parte del proyecto FONDEF ID23I10113 “*Desarrollo y Validación de Sistema de Gestión de Pavimentos Aeroportuarios para la Red Primaria de Chile*”, se busca una gestión sostenible, que integre criterios sociales y medioambientales como parte del proceso de toma de decisiones. Esta herramienta será mediante su aplicación en un aeropuerto correspondiente a la red.

Como resultado de esta investigación, se espera evaluar la viabilidad de integrar criterios sostenibles en los procesos del sistema de gestión planteado, y diseñar estrategias para su implementación, con el objetivo de promover una gestión sostenible en la toma de decisiones relacionadas con el ciclo de vida de los pavimentos aeroportuarios.

1.1 Definición del Problema

El problema que se busca solucionar corresponde a la forma en que la DAP realiza actualmente la toma de decisiones, considerando únicamente criterios económicos y técnicos. Asimismo, no dispone de un sistema de gestión que les permita integrar distintos análisis y realizar un mejor manejo de la información disponible (Tolmo, 2020).

Esta falta de consideración de criterios sostenibles genera decisiones alejadas de los objetivos que se tienen a nivel nacional e incluso internacional. La forma de gestionar las actividades impide que se realicen evaluaciones adecuadas de los impactos ambientales y sociales, por lo que no se está visualizando cómo estas actividades afectan a sus alrededores. Es importante integrar estos criterios para aportar a un futuro responsable y equilibrado, siguiendo las metas ambientales que se tienen en los aeropuertos de Chile (Arteaga et al., 2024) y los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) (MDSF, 2023).

Como parte del proceso para alcanzar una toma de decisiones basada en criterios sostenibles es de gran importancia considerar el impacto medioambiental, permitiendo que las actividades asociadas al ciclo de vida de los pavimentos sean más amigables con el entorno y con el planeta.

2 Objetivos

En esta sección se presentan los objetivos de esta investigación.

2.1 Objetivo General

El objetivo general de este trabajo es integrar criterios sostenibles, en particular los relacionados con los impactos medioambientales, a un sistema de gestión de pavimentos aeroportuarios que será aplicado en la red primaria de Chile.



2.2 Objetivos Específicos

Para lograr la meta planteada anteriormente se establecen los siguientes objetivos específicos:

1. Identificar los parámetros ambientales aplicables a la toma de decisiones de mantenimiento y rehabilitación (M&R) de pavimentos de aeropuertos.
2. Definir una metodología para estimar los parámetros ambientales aplicables a la toma de decisiones de mantenimiento y rehabilitación (M&R) de pavimentos de aeropuertos.
3. Proponer un criterio ambiental aplicable al Sistema de Gestión de Pavimentos Aeroportuarios, comparando distintos métodos para evaluar las emisiones de las actividades de mantenimiento y rehabilitación (M&R).

3 Metodología de Trabajo

La presente investigación contempla tres objetivos específicos (OE) para los cuales se han definido las etapas metodológicas para cada uno de ellos, presentadas en la Tabla 1.

Tabla 1 Etapas y actividades para los objetivos específicos.

OE	Etapas	Actividades
1	Revisión bibliográfica.	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Investigación a través de una revisión bibliográfica, de las normativas y criterios sostenibles aplicables a la gestión de pavimentos aeroportuarios.
	Análisis de criterios.	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Identificación de criterios relevantes relacionados con la sostenibilidad en el ciclo de vida de los pavimentos aeroportuarios, analizando y comparando la importancia, magnitud de efectos y su validez en el contexto de la red primaria de Chile. ▪ Análisis de información necesaria para aplicar criterios, formas de estimar, unidad de medida, entre otros.
	Selección de parámetros.	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Selección de parámetros aplicables al Sistema de Gestión de Pavimentos Aeroportuarios (SGPA) y al contexto de la investigación.
2	Proposición de estimación de parámetros.	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Selección de una herramienta de estimación de impactos ambientales para ser utilizada en esta investigación.
3	Proposición de método de comparación	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Búsqueda de métodos de comparación utilizados actualmente para criterios medio ambientales, considerados en sistemas de gestión de pavimentos. ▪ Proposición de uno o más métodos para la implementación de los criterios, considerando los usados en otros países y las normativas ambientales relacionadas.
	Integración al sistema de gestión.	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Identificación de los pasos necesarios para su aplicación, considerando las características de lo realizado en el punto anterior. ▪ Realización de un plan de aplicación, explicando la información y consideraciones necesaria para ser incorporado a la optimización de un sistema de gestión.
	Validación y ajustes.	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Verificación de la aplicabilidad de lo propuesto anteriormente, aplicándolo a la optimización del aeropuerto La Florida. ▪ De ser necesario, realización de ajustes a la metodología de aplicación.

En la Figura 1 se muestra la relación gráficamente entre las etapas de investigación y los resultados esperados para cada uno de los tres objetivos específicos definidos anteriormente.

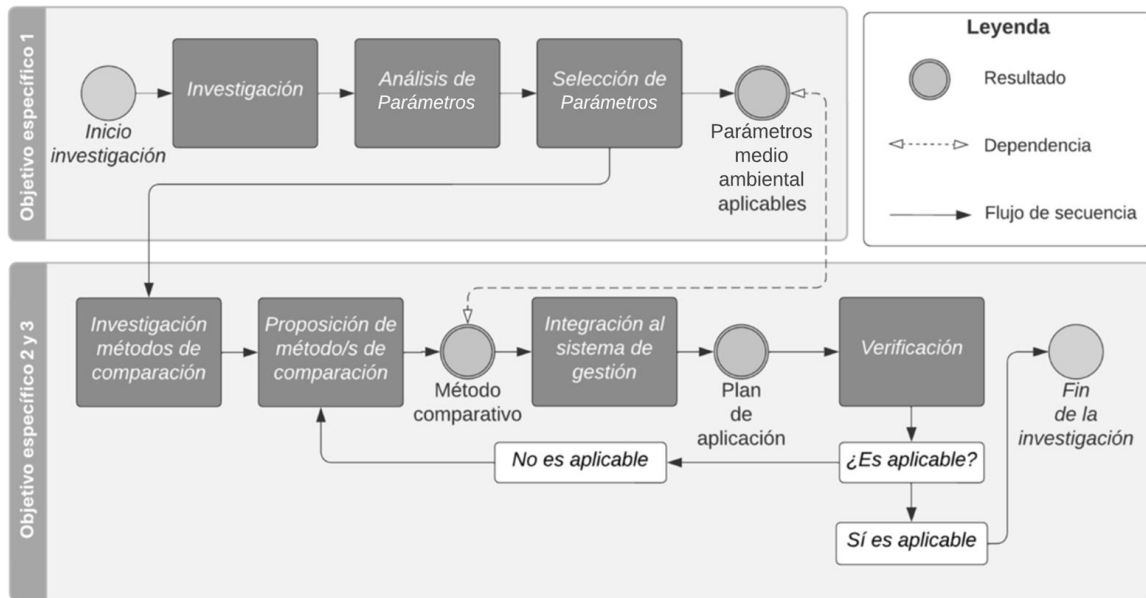


Figura 1 Diagrama de las etapas de la investigación.

4 Marco teórico

4.1 Sistema de gestión de pavimentos (SGP)

El SGP corresponde a una herramienta que integra distintas actividades que sirven como apoyo a la toma de decisiones en el ciclo de vida del pavimento, orientando la organización y optimización de la información disponible y los recursos usados en el mantenimiento y reconstrucción de los pavimentos (De Solminihac Hernán et al., 2018). Su finalidad es evaluar diferentes estrategias de manera objetiva, definiendo el momento óptimo de intervención del pavimento, cuáles deben ser tratados y qué actividad se debe realizar, garantizando su funcionalidad y capacidad estructural, evitando una gestión más costosa (Chang, 2020).

El Sistema de Gestión de Pavimentos Aeroportuarios (SGPA), adoptado como base de referencia para el proyecto FONDEF, se muestra en la Figura 2. En ella se observan las principales etapas del sistema: la base de datos, los procesos, las metodologías y los resultados.

La etapa de optimización, en la cual Tolmo (2020) propone la incorporación de un criterio ambiental, tiene como objetivo definir qué alternativa de actividad cumple de forma óptima con los requisitos establecidos previamente (De Solminihac Hernán et al., 2018).

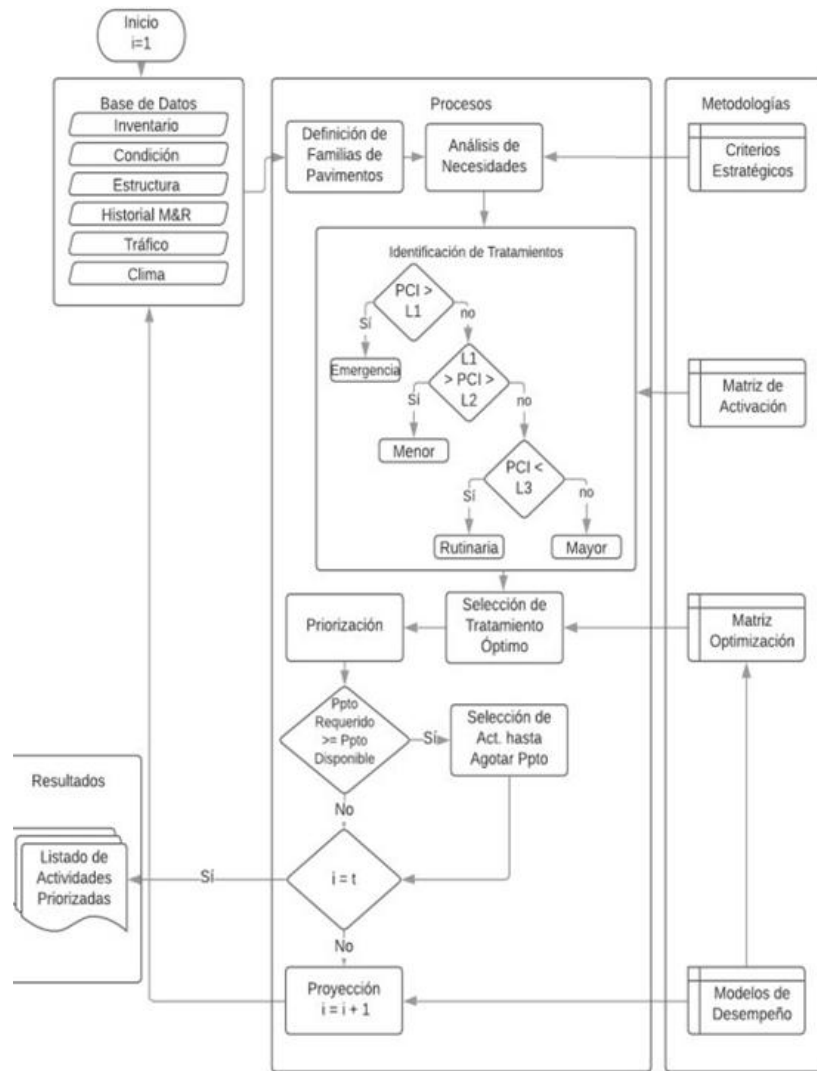


Figura 2 Diagrama de SGPA usado como base en proyecto FONDEF (Tolmo, 2020).

4.2 Red Aeroportuaria en Chile

La red aeroportuaria en Chile desempeña un papel estratégico en la conectividad y el desarrollo del país, siendo administrada en gran parte por la Dirección General de Aeronáutica Civil (DGAC). Esta red está compuesta por 344 aeródromos, 102 helipuertos y 7 aeropuertos ubicados en distintas regiones del país. Estas infraestructuras se clasifican según su uso: 11 son parte de la Red de Aeródromos Militares, 303 integran la Red de Pequeños Aeródromos y 17 pertenecen a la Red Primaria (DGAC, 2019).

De acuerdo con la información proporcionada por la Dirección de Aeropuertos (2024b), la Red Primaria está conformada por los aeropuertos y aeródromos más relevantes para la conectividad nacional e internacional del país. Entre ellos se destaca el aeropuerto Arturo Merino Benítez, la principal terminal aérea. Esta red es clave para la economía de las distintas regiones, permitiendo el transporte de carga y pasajeros en ubicaciones estratégicas.

En la Tabla 2, se presentan los aeropuertos y aeródromos que conforman esta categoría, para los cuales se desarrollará un SGPA.



Tabla 2 Aeropuertos y aeródromos de la Red Primaria (Dirección de Aeropuertos, 2024b).

Tipo	Aeropuerto	Región
Aeropuerto	Chacalluta	Arica
	Diego Aracena	Iquique
	Andrés Sabella	Antofagasta
	Mataverí	Rapanui
	Arturo Merino Benítez	Santiago
	El Tepual	Puerto Montt
	Presidente Carlos Ibáñez del Campo	Punta Arenas
Aeródromo	El Loa	Calama
	Desierto de Atacama	Caldera
	La Florida	La Serena
	CarrielSur	Concepción
	La Araucanía	Freire
	Pichoy	Mariquina
	Balmaceda	Balmaceda
	Cañal Bajo	Osorno
	Mocopulli	Mocopulli
Teniente Julio Gallardo	Puerto Natales	

En base al diagnóstico realizado por Tolmo (2020), actualmente esta red no cuenta con un SGPA para administrar los pavimentos de los distintos aeropuertos y aeródromos de forma integral. Por ello, las acciones suelen ser reactivas durante el ciclo de vida de estos activos.

La DAP cuenta con distintas herramientas que utiliza actualmente como apoyo en la toma de decisiones. Entre ellas se encuentra la evaluación de la condición del pavimento a través del índice Pavement Condition Index (PCI), una matriz de priorización que asigna un ranking a los pavimentos según necesidades y prioridades definidas por la DAP. Por otro lado, cuentan con la matriz ONDAP donde se almacena información de proyectos anteriores.

Asimismo, se tienen herramientas en desarrollo, como una base de datos, modelos de desempeño para predecir el PCI de los pavimentos a futuro. Sin embargo, pese al uso de estos avances, actualmente no se consideran criterios ambientales ni sociales en la toma de decisiones.

4.3 Tratamientos y Mantenimientos

4.3.1 Deterioros

Debido a la operación aérea y a los efectos climáticos, los pavimentos aeroportuarios se deterioran progresivamente durante su vida útil, lo que afecta tanto su funcionalidad como su capacidad estructural. Esta condición puede representar un riesgo para la seguridad en las operaciones del tráfico aéreo.

A continuación, se presentan en la Tabla 3 y Tabla 4 los deterioros evaluados por la DAP para pavimentos flexibles y rígidos, junto con su clasificación por niveles de severidad: bajo (B), medio (M) y alto (A).



Tabla 3 Deterioros en pavimentos asfálticos aeroportuarios (Departamento de Planificación, 2024; Ortiz et al., 2021).

Tipo de deterioro	Descripción	Severidad	Unidad
Grietas de tipo piel de cocodrilo	Se presenta visualmente como la piel de un cocodrilo, es decir, un conjunto de piezas con muchos lados y ángulos agudos, las grietas aparecen desde el fondo de la capa asfáltica. Este deterioro es debido a ciclos de carga o deflexión de la capa asfáltica por inestabilidad de la fundación, lo que provoca fatiga del pavimento.	B, M y A	m ²
Afloramiento de asfalto	El pavimento se ve con una textura lisa debido a material asfáltico, el cual aflora en la superficie. Esto afecta la seguridad reduciendo la resistencia al deslizamiento. Ocurre en presencia de altas temperaturas y exceso de material asfáltico en la mezcla, riegos de liga e imprimación o solventes.	-	m ²
Grietas en bloque	Se forman trozos regulares con ángulos agudos, muchos lados y rectangulares. Este deterioro no depende del tránsito, si no de los ciclos de temperatura día-noche, ocurriendo en áreas pavimentadas extensas.	B, M y A	m ²
Corrugamiento	Se puede observar cómo ondulaciones, provocadas por inestabilidad del asfalto. Esto es consecuencia de agregados gruesos con formas redondas o lisas, demasiados agregados finos o asfalto, o por ablandamiento del pavimento.	B, M y A	m ²
Depresiones	Son hundimientos en áreas limitadas, debido a la falta de compactación, cargas muy altas o problemas en la construcción. En estas depresiones se acumula agua provocando deterioro en el pavimento, además, puede afectar la seguridad del tránsito debido al hidroneo.	B, M y A	m ²
Erosión por chorro jet	Afecta el pavimento hasta una profundidad de 13 [mm], siendo la quema del asfalto debido al chorro jet de las aeronaves. El pavimento se oscurece en la zona afectada.	B	m ²
Grietas de reflexión de juntas de hormigón	Ocurren por la reflexión de juntas en la capa subyacente de hormigón hacia la capa asfáltica superficial.	B, M y A	m
Grietas longitudinales y transversales	Causado por el envejecimiento del pavimento, variaciones térmicas, contracciones de la carpeta de rodamiento y problemas en la construcción como mal drenaje, falta de compactación, entre otros.	B, M y A	m
Derrame de combustible	Produce ablandamiento del asfalto.	-	m ²
Baches o parches	Los baches son debido a la falta de resistencia en la capa superficial, por un bajo espesor, falta de ligante o agregados finos. Se ven afectados por el tráfico y por los ciclos de hielo-deshielo. Se observan como zonas con una concentración de falta de material. Pueden provocar acumulación de agua lo que puede llevar a fallas críticas. Los parches corresponden a la sustitución de la capa asfáltica con material de relleno.	B, M y A	m ²



Tabla 3 Deterioros en pavimentos asfálticos aeroportuarios (continuación) (Departamento de Planificación, 2024; Ortiz et al., 2021).

Tipo de deterioro	Descripción	Severidad	Unidad
Agregados pulidos	Ocurren por una baja cantidad de agregado o con falta de rugosidad en la superficie, por lo que se tiene mala resistencia al deslizamiento.	-	m ²
Erosión superficial	Se refiere al desprendimiento de partículas en la capa superficial, por falta de adherencia entre asfalto y agregados. Este problema se relaciona al envejecimiento del ligante, agregados pétreos no compatibles con el asfalto o defectos en la construcción. El pavimento se ve con una textura irregular. Esto se genera por el chorro de las turbinas o la alta velocidad de las aeronaves.	B, M y A	m ²
Ahuellamiento	Ocurre en el tren de aterrizaje en la zona donde estos se concentran. Son formaciones de canales en las huellas de las aeronaves, pueden ser deformaciones por consolidación del material o permanentes en la subrasante.	B, M y A	m ²
Grietas por resbalamiento	Deformaciones en forma de medialuna, se deben al deslizamiento de la capa superficial, provocado por el giro y frenado de las aeronaves, además, por una mala adherencia entre capas y baja resistencia de la superficie. Dentro de esta categoría también entran las grietas semicirculares por tensiones tangenciales en el derrape de las aeronaves en giros cerrados.	-	m ²
Hinchamiento	Es una onda en el pavimento que puede ser en un área pequeña o ser larga. Ocurre por efectos en la subrasante de las heladas por presencia de suelos expansivos.	B, M y A	m ²

Tabla 4 Deterioros en pavimentos rígidos aeroportuarios (Departamento de Planificación, 2024; Ortiz et al., 2021).

Tipo de deterioro	Descripción	Severidad	Unidad
Levantamiento de losas por dilatación	Ocurre cuando la losa no cuenta con espacio suficiente para expandirse térmicamente, lo que genera alabeo o colapso debido a la presión acumulada. Esta condición se relaciona con la presencia de material infiltrado en grietas laterales o juntas.	B, M y A	Losas
Grietas de esquina	Aparecen en la esquina de la losa debido al alabeo, pérdidas de soporte y las cargas de tránsito.	B, M y A	Losas
Grietas longitudinales, transversales y diagonales	Se originan debido a deficiencias constructivas, cargas excesivas o capas estructurales inadecuadas para las solicitaciones del pavimento.	B, M y A	Losas
Grietas tipo "D"	Son grietas paralelas a la junta, se forman por las condiciones climáticas a las que está expuesto el pavimento como los ciclos de hielo-deshielo.	B, M y A	Losas



Tabla 4 Deterioros en pavimentos rígidos aeroportuarios (continuación) (Departamento de Planificación, 2024; Ortiz et al., 2021).

Tipo de deterioro	Descripción	Severidad	Unidad
Daño al sello de juntas	Ocurre por un mal proceso de sellado, sellado que no corresponde, junta con desechos o de un ancho incorrecto. Esto permite la infiltración de agua, provocando deterioro en capas inferiores o bombeo. Además, impide la expansión de la losa, lo que puede causar alabeo o colapso.	B, M y A	Losas
Parche $\leq 0.50 \text{ m}^2$	Área en la cual el pavimento ha sido reemplazado por nuevo material.	B, M y A	Losas
Parche $> 0.50 \text{ m}^2$	Área en la cual el pavimento ha sido reemplazado por nuevo material.	B, M y A	Losas
Agujeros	Se trata de agujeros de área reducida. Pueden ser provocadas por áridos grandes desprendidos o por ciclos de hielo-deshielo.	-	Losas
Bombeo	Presencia de manchas o expulsión de material en zonas cercanas a juntas o grietas. Se produce por infiltración de agua, falta de transferencia de carga y tránsito de aeronaves, lo que genera presión hidráulica que empuja el material a la superficie.	-	Losas
Escamaduras, grietas tipo mapa y cuarteaduras	Desprendimiento superficial de partículas pequeñas, asociado a un curado deficiente del hormigón, selección inadecuada de agregados o mezclas mal proporcionadas. Las grietas tipo mapa y las cuarteaduras son superficiales y delgadas. La escamadura implica pérdida de la capa de desgaste.	B, M y A	Losas
Escalonamiento	Corresponde a la elevación debido a suelos expansivos, descongelamiento, pérdida de finos o de transferencia de cargas.	B, M, y A	Losas
Grietas en bloque (losas destrozadas)	Son piezas con forma de bloques formada por intercepción de grietas. Se debe a problemas con la fundación o por el tráfico aéreo.	B, M y A	Losas
Grietas de retracción	Se generan en la construcción del pavimento, en la etapa de curado y colocación. Son grietas muy delgadas y aparecen en toda la losa.	B, M y A	Losas
Astillamiento en juntas	Es la fracturación de la losa a 60 [cm] de la junta, provocada por material infiltrado, grandes tensiones, y hormigón débil y mal uso de pasadores, esto sumado al tráfico aéreo.	B, M y A	Losas
Astillamiento de esquina	Es la fracturación de la losa a 60 [cm] de las esquinas de la losa, debido a material infiltrado, grandes tensiones, y hormigón débil y mal uso de pasadores, esto sumado al tráfico aéreo. Ocurrendo antes que el astillamiento en juntas.	B, M y A	Losas



4.3.2 Mantenimientos

De acuerdo con el informe elaborado por FERRER y Asociados Ingenieros Consultores (2020), se proponen diversas actividades de mantenimiento aplicables a pavimentos aeroportuarios. Estas actividades están clasificadas según el tipo de pavimento, como se detalla en la Tabla 5. Además, en la Tabla 6 se incluyen otros tratamientos adicionales que también fueron considerados en el presente análisis.

Tabla 5 Actividades de mantenimientos realizados en pavimentos aeroportuarios (Dirección de Aeropuertos, 2013b; FERRER y Asociados Ingenieros Consultores, 2016, 2020).

Tipo de pavimento	Actividad	Definición	Unidad
Hormigón	Bacheo espesor total	Corresponde al reemplazo de material en un área de la losa en todo su espesor.	m ²
	Reemplazo de losa	Como su nombre lo indica se realiza un reemplazo completo de la losa.	m ²
	Bacheo espesor parcial	Reemplazo de material en un área específica solamente en una porción del espesor de la losa.	m ²
	Sello de juntas	Proceso de sellado de junta con material resiliente y adherente.	m
Asfalto	Bacheo profundo	Corresponde al reemplazo de material en la capa superficial, base y a veces en la subbase.	m ²
	Bacheo superficial	Reemplazo de parte de la capa superficial,	m ²
	Bacheo nivelante	Se nivela la superficie, luego de la reparación de un bache.	m ²
Ambos	Sello de grieta	Se realiza una limpieza de las grietas para luego sellarlas.	m

Tabla 6 Otros mantenimientos considerados en la investigación (Dirección de Aeropuertos, 2013a, 2017).

Tipo de pavimento	Actividad	Definición	Unidad
Asfalto	Tratamiento superficial bituminoso múltiple	Aplicación de asfalto recubierto con agregados pétreos en múltiples capas sobre la superficie.	m ²
	Riego de sello o Fog seal	Corresponde a un riego utilizando emulsión asfáltica. Esto disminuye la porosidad y pequeñas grietas, también ayuda a retener los áridos de la superficie.	m ²
	Lechada asfáltica o Slurry seal	Se realiza sobre la capa de rodado o capa asfáltica, en la que se esparce una mezcla de emulsión asfáltica, agregados pétreos y agua.	m ²

4.4 Contexto Chileno

A nivel mundial, en 2015 se estableció la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible, una hoja de ruta que busca fomentar un desarrollo equitativo, inclusivo y respetuoso con el medio ambiente. Esta agenda está compuesta por 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), que abordan temáticas sociales, económicas y ambientales, como se muestra en la Figura 3 (MDSF, 2023).

Uno de los ODS más relevantes para esta investigación es el “Objetivo 13: *Adoptar medidas urgentes para combatir el cambio climático y sus efectos*”. Este objetivo está orientado a enfrentar el aumento de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), el incremento de temperaturas, un aumento en el nivel del mar, los cambios en los fenómenos meteorológicos, escasez de alimentos y agua que genera a nivel mundial. Para combatir estos efectos, se propone limitar el aumento de temperatura a un máximo de 1,5 °C, esto requiere una reducción urgente a la mitad de las emisiones netas para el año 2030 (ONU, 2025).



Figura 3 Objetivos de desarrollo sostenible (MDSF, 2023).

El sector de la construcción emite aproximadamente el 38% de las emisiones de gases de efecto invernadero a nivel mundial, además de consumir el 35% de la energía primaria. Del total de emisiones de este sector, el 25 % corresponde a los materiales y su uso en las construcciones (Valencia et al., 2021).

Debido a esto, Chile se ha comprometido a lograr la carbono neutralidad para el año 2050, como parte de las Contribuciones Nacionalmente Determinadas (NDC) (Valencia et al., 2021). Las NDC constituyen el instrumento mediante el cual los países comunican los esfuerzos que realizarán para cumplir los objetivos establecidos en el Acuerdo de París (Ministerio del Medio Ambiente, 2025).

En la Estrategia Nacional de Huella de Carbono en el Sector Construcción, Valencia et al. (2021) proponen distintas metas para alcanzar emisiones netas cero, entre las cuales se espera que en 2025 se establezca una línea base que servirá como referencia para las distintas metas de los años posteriores. Ese objetivo se encuentra definido en la Ley 21.455, “*Ley Marco del Cambio Climático*”, donde se establece la implementación de acciones para mitigar las emisiones (Cid et al., 2024), como por ejemplo, la reforestación y la conservación de hectáreas para cumplir las metas, como se muestra en la Figura 4 (Gobierno de Chile, 2021).

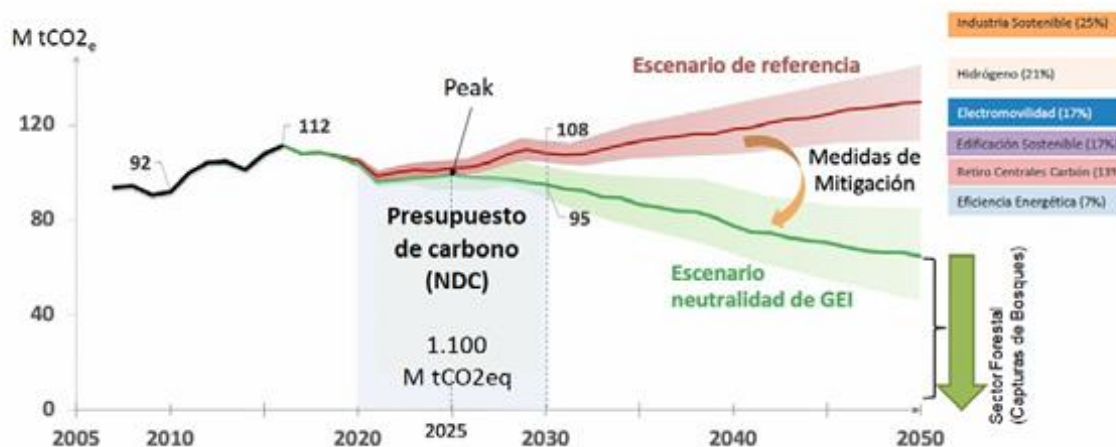


Figura 4 Representación de las metas de neutralidad (Gobierno de Chile, 2021).

Otra meta relevante para el caso de estudio establece que, para el año 2040, las infraestructuras aeroportuarias privadas deben reducir en un 50% el promedio de sus emisiones incorporadas (es decir, aquellas producidas durante el ciclo de vida de una infraestructura debido a los materiales utilizados y los procesos constructivos), así como también sus emisiones operacionales. En el caso de las infraestructuras públicas, se exige que las emisiones operacionales netas sean nulas y las incorporadas se reduzcan en un 50%. Estas metas se definen con respecto a la línea base mencionada anteriormente. Como objetivo final, se espera que el 100% de estas estructuras alcancen la carbono neutralidad, cumpliendo con el compromiso nacional (Valencia et al., 2021).

4.5 Criterios Sostenibles.

La sostenibilidad es un concepto abstracto cuya definición varía según el área de análisis. Una de sus definiciones es “*desarrollo que satisface las necesidades del presente sin comprometer las generaciones futuras*” (Naciones Unidas, 1987) Esta definición considera distintas áreas de forma integrada para responderá a las necesidades actuales.

Existen distintas categorías de criterios que forman parte de este concepto. En el caso de pavimentos aeroportuarios, pueden incluirse parámetros técnicos, económicos, ambientales y sociales (Alabi et al., 2021).

Actualmente, los criterios técnicos y económicos ya son considerados por la DAP (Tolmo, 2020). Sin embargo, los criterios ambientales y sociales presentan dificultades para su integración, en especial este último, debido a que puede ser de carácter subjetivo, no suelen estar definidos y están relacionados con la política nacional. Por esta razón, Tolmo (2020) propone implementar un indicador ambiental dentro de la etapa de optimización del SGPA.

4.5.1 Criterios Medioambientales.

Como su nombre lo indica, este criterio considera los impactos ambientales provocados por la realización de una actividad, los cuales se reflejan en los distintos parámetros asociados. En el caso de los pavimentos, suele considerarse los materiales utilizados (tanto en su producción como transporte) y la operación de la actividad al realizar el análisis de este criterio.

Debido al contexto del proyecto, estos parámetros deben ser estimados considerando la información disponible por la DAP. Para ello, se puede utilizar herramientas computacionales como por ejemplo PaLATE (Tisberger Ibañez, 2019), GaBi (Chen & Thakkar, 2016), OpenLCA, Klimatkalkyl, entre muchas otras.



Estos softwares realizan los cálculos a partir de bases de datos construidas en contextos específicos. Por ejemplo, PaLATE utiliza datos válidos en Estados Unidos; GaBi cuenta con una base de datos más amplia, aunque con escasa información para Chile y no asociadas a esta investigación (Sphera, 2023); mientras que Klimatkalkyl se basa en el contexto sueco. Por esta razón, si se emplea herramientas al contexto chileno deben ser adaptadas, o bien, los resultados obtenidos deben considerarse únicamente como valores de referencia.

Otra posible fuente de información, más acorde al contexto de esta investigación, son las Evaluaciones de Impacto Medio Ambiental (EIA), elaboradas por las empresas al momento de postular a las licitaciones para realizar actividades de mantenimiento y rehabilitación de los pavimentos aeroportuarios a través de Mercado Público.

A continuación, en la Tabla 7 se presentan los parámetros asociados al impacto ambiental que puede ser estimado mediante herramientas computacionales. Estos fueron recopilados a partir de los siguientes softwares: PaLATE V2.2, GaBi, DuboCalc, VTTI/UC, Ecorce-M, asPECT, Athena Pavement LCA, Klimatkalkyl, OpenLCA y SMART SPP.

Tabla 7 Impactos ambientales estimables por herramientas computacionales.

Sigla	Impacto	Definición	Parámetros
	Acidificación	<ul style="list-style-type: none"> • Reducción del PH de masas de agua. • Se debe a la disolución de CO_2 en el agua. • Afecta la vida marina. (óxidos de azufre y óxidos de nitrógeno) 	NO_2 , NO_x , SO_2 , CO_2 y PM_{10} .
ADP	Agotamiento abiótico	<ul style="list-style-type: none"> • Uso excesivo y disminución de recursos naturales no vivos. 	No Fósil y Fósil.
ODP	Agotamiento del ozono	<ul style="list-style-type: none"> • Disminución de la capa de ozono en la estratosfera. 	
	Consumo de agua	<ul style="list-style-type: none"> • Consumo de agua. 	
	Consumo de energía	<ul style="list-style-type: none"> • Consumo de energía. 	Energía no renovable, Energía renovable y Energía total.
	Creación de ozono fotoquímico	<ul style="list-style-type: none"> • Formación de ozono fotoquímico lo cual realiza el mantenimiento y formación de ozono estratosférico que protege de la radiación UV. • Se forma O_3. 	NO_x y CO
	Ecotoxicidad	<ul style="list-style-type: none"> • Capacidad de los químicos dañinos para la vida. 	Hg y Pb
	Eutroficación	<ul style="list-style-type: none"> • Aumento de nutrientes (generalmente nitrógeno y fósforo). • Aumenta el crecimiento de las algas, puede crear zonas anoxicas o hipóxicas. 	N y PO_4
GEI	Gases de efecto invernadero	<ul style="list-style-type: none"> • Gases que "atrapan" el calor. 	CO_2 , CH_4 y H_2O
	Material particulado	<ul style="list-style-type: none"> • Partículas pequeñas sólidas o líquidas en el aire. 	PM_{10} y $PM_{2,5}$



Tabla 7 Impactos ambientales estimables por herramientas computacionales (continuación).

Sigla	Impacto	Definición	Parámetros
PCG	Potencial Calentamiento Global	<ul style="list-style-type: none"> Capacidad de un gas de retener calor en comparación del CO_2 (GWP=1) 	CO_2 , CH_4 y N_2O
POCP	Potencial de Calentamiento Global de Corto Plazo	<ul style="list-style-type: none"> Capacidad de un gas de retener calor en comparación del CO_2 (GWP=1) en periodo determinado. 	
	Toxicidad crónica	<ul style="list-style-type: none"> Sustancias químicas que tienen efectos adversos en humanos debido a la exposición por un largo periodo de tiempo. 	Hg y Pb
TP	Toxicidad potencial (humana)	<ul style="list-style-type: none"> Sustancias químicas que afectan la salud humana. 	Cancerígeno y No cancerígeno

4.6 Ejemplos de aplicación de criterios ambientales para M&R de pavimentos aeroportuarios

A continuación, se presentan ejemplos de análisis de actividades de M&R de pavimentos realizados en Estados Unidos, en los cuales se han incorporaron criterios ambientales.

Un ejemplo de aplicación fue la investigación realizada por Rahman & Tarefder (2012), en la cual se analizaron cuatro aeropuertos del estado de Nuevo México, considerando la metodología de Análisis del Ciclo de Vida de Costos (LCCA, por sus siglas en inglés), por lo que los criterios considerados fueron evaluados en unidades monetarias.

En cuanto al criterio ambiental, se utilizó la herramienta PaLATE para estimar diversos impactos. Sin embargo, solamente consideró la contaminación del aire, específicamente los gases NO_x y SO_2 , debido a que en Estados Unidos estos parámetros cuentan con valores monetarios establecidos oficialmente (Rahman & Tarefder, 2012).

En otro estudio realizado en el aeropuerto de Nashville, se compararon distintas actividades de M&R, utilizandola misma metodología del ejemplo anterior. En este caso, se utilizó una herramienta más actualizada para la estimación de emisiones: GaBi (Chen & Thakkar, 2016).

Los impactos considerados en este caso fueron el Potencial Calentamiento Global (GWP, por sus siglas en inglés), el material particulado menor a 2.5 [mm] ($PM_{2.5}$) y el consumo energético (Chen & Thakkar, 2016).

Finalmente, Kulikowski (2017) aplicó un enfoque similar para evaluar las actividades en el aeropuerto Internacional O'Hare, en Chicago. En este estudio, solo se consideró como criterio ambiental GWP, aplicándolo a pavimentos aeroportuarios de hormigón y asfalto. Para la estimación de impactos, se utilizó la herramienta LCA-AIR, la cual actualmente no se encuentra disponible para su aplicación.

4.7 Métodos Comparativos de Impactos Ambientales

Existen diversos tipos de impactos ambientales, cada uno con distintas unidades de medida e importancia. Por ello, es necesario establecer una metodología que permita compararlos y sintetizarlos en un único parámetro, el cual será integrado como criterio en la optimización del SGPA.

Además, esta metodología permitirá definir cuáles impactos serán considerados y de qué forma serán incorporados en el proceso de toma de decisiones.

4.7.1 Costos-beneficios Monetarios de Impactos Medioambientales

Este método permite evaluar los impactos ambientales a través de su costo o beneficio, expresado en una unidad monetaria. Esta forma de cuantificación facilita la integración del criterio ambiental en la etapa de optimización del SGPA, ya que permite considerar los efectos negativos o positivos de las actividades de mantenimiento y rehabilitación.

En Chile, el Sistema Nacional de Inversiones (SNI) define anualmente el Precio Social del Carbono (PSC), el cual corresponde a un valor monetario asignado a las emisiones de GEI, expresadas como dióxido de carbono equivalente (CO_2_{eq}). Este precio busca orientar las Iniciativas de Inversión (IDI) hacia alternativas que reduzcan sus emisiones y desincentiven aquellas menos sostenibles (División de Evaluación Social de Inversiones, 2024).

En la Figura 5 se presentan los valores históricos del PSC en Chile, los cuales muestran una tendencia creciente a lo largo del tiempo. Esta evolución favorece el fortalecimiento de las políticas públicas para incorporar criterios ambientales en la evaluación de proyectos.

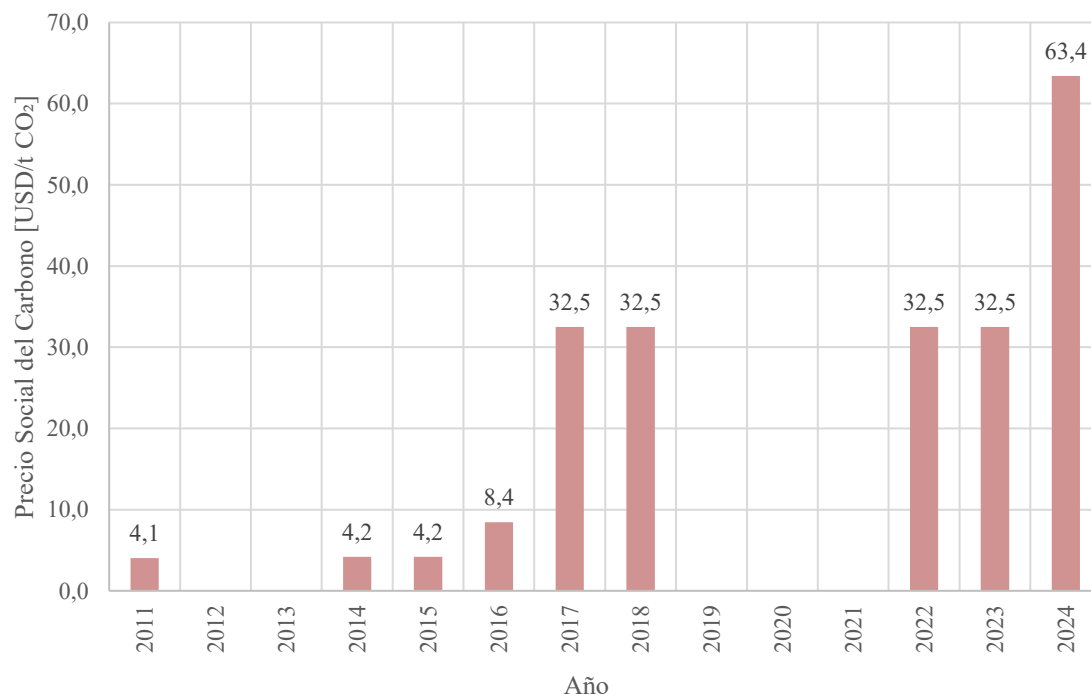


Figura 5 Precios Sociales del Carbono en Chile (División de Evaluación Social de Inversiones, 2014, 2015, 2016, 2017, 2018, 2022, 2023, 2024; Gobierno de Chile, 2021).



Actualmente, el valor vigente del PSC es de 63.4 [USD/tCO₂ eq], lo que equivale a 1.524 [UF/tCO₂ eq] o 56,086 [CLP/tCO₂ eq] según la División de Evaluación Social de Inversiones (2024). Este valor fue estimado siguiendo la metodología propuesta por Cid et al. (2024), basada en lo sugerido y respaldado por la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL).

La estimación del PSC se basa en el cálculo del costo de mitigación necesario para alcanzar un objetivo político específico. En el caso de Chile, dicho objetivo está definido en las Contribuciones Nacionalmente Determinadas (NDC), las cuales establecen los compromisos internacionales del país en materia de reducción de emisiones de gases de efecto invernadero.

Para la estimación, se comparan dos escenarios:

- Un escenario tendencial, en el que no se implementan medidas adicionales de mitigación.
- Un escenario con la aplicación total de las acciones requeridas para cumplir las metas climáticas.

Además, se incorporan las medidas de mitigación sectoriales y la tasa social de descuento del 4% establecida por el Sistema Nacional de Inversiones en Chile, la cual permite valorar los efectos futuros causados por emisiones actuales en términos económicos (Cid et al., 2024).

A partir de esta información, se construyen las curvas de costo marginal de abatimiento (MACC, por sus siglas en inglés), las cuales, según Cid et al. (2024), relacionan el costo de cada medida de mitigación (es decir, el costo de reducir una tonelada de CO₂) con su potencial de reducción (cuántas emisiones puede evitar). Estas curvas se grafican ordenando las medidas desde las más económicas hasta las más costosas, lo que permite visualizar qué combinación de acciones permite alcanzar la meta climática al menor costo posible.

El valor que se adopta como Precio Social del Carbono al año 2050 corresponde al costo de la última medida necesaria para cumplir la meta de carbono neutralidad, cuyo valor es de 264.15 [USD/ton CO₂] (Cid et al., 2024).

Para estimar los valores intermedios del PSC entre los años 2020 y 2025, se aplicó una interpolación lineal entre el valor inicial (32.5 [USD/ton CO₂]) y el valor meta proyectado para el año 2050 (264.15 [USD/ton CO₂]). El resultado de esta interpolación se expresa mediante la siguiente fórmula:

$$\text{Precio Social del Carbono} = 7.72 \cdot (x) + 24.778 \quad (1)$$

Donde:

x : Número de años transcurridos desde el año base considerado (2020).

La Figura 6 muestra la evolución estimada del PSC para el periodo 2020–2050. Es importante destacar que tanto la metodología como los valores asociados pueden ser modificados en las actualizaciones anuales del Informe de Precios Sociales.

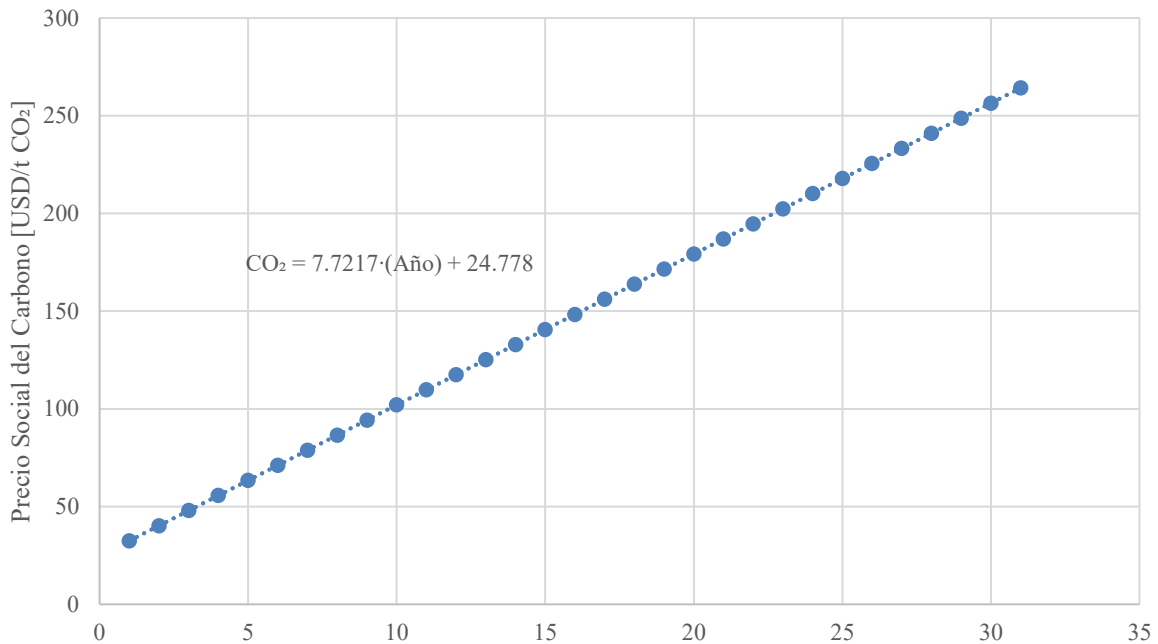


Figura 6 Estimación Precio Social del Carbono 2024 (Cid et al., 2024).

4.7.2 Índice Medioambiental

Una alternativa para integrar múltiples parámetros en el análisis medioambiental es la construcción de un índice, el cual debe ser aplicable, contextualizado y adaptable. Este enfoque permite incorporar un mayor número de variables dentro del criterio ambiental, ampliando la capacidad de evaluación entre diferentes alternativas.

En el caso de los pavimentos, existe poca información sobre la aplicación al análisis de las actividades de M&R de pavimentos.

Un índice propuesto por Chiola et al. (2023) para ser considerado en el análisis del ciclo de vida de los pavimentos asfálticos es el Environmental Asphalt Rating (EAR). Este se basa en los impactos obtenidos a partir de la certificación de Declaración Ambiental de Producto (EPD, por sus siglas en inglés).

Para su aplicación, los parámetros se categorizan en tres grupos: impactos relacionados con las emisiones (A), con el uso de recursos (B) y con los flujos de categoría de residuos (C) (Chiola et al., 2023).

En la Figura 7 se presenta la metodología de cálculo de este índice, comenzando con la recopilación de datos provenientes de la certificación EPD. Luego, los datos se normalizan usando la Ecuación (2), los cuales son usados posteriormente para calcular el valor ponderado v_w . Para este cálculo, es necesario determinar si los parámetros son positivos (disminuyen el impacto) o negativos (aumentan el impacto). Además, cada parámetro tiene un ponderador asignado según su importancia.

Chiola et al. (2023) establecieron, para el caso de estudio italiano, que todos los parámetros tendrían el mismo ponderador, excepto el consumo de agua dulce, cuyo ponderador es igual a cero, y el consumo de combustibles fósiles junto con las emisiones de gases de efecto invernadero, que tienen ponderadores mayores. Para garantizar la adaptabilidad del índice, la suma total de los ponderadores es igual a 10.

$$I_f = \frac{v_m}{V_n} \quad (2)$$

Donde:

v_m : Valor absoluto del parámetro medioambiental.

V_n : Valor máximo reportado en EPD.

El aporte de cada parámetro se calcula mediante las Ecuaciones (3) y (4). Posteriormente, los resultados obtenidos se suman dentro de cada una de las categorías de los parámetros (A, B y C).

$$v_w = I_f w_f ; \text{ para impactos positivos.} \quad (3)$$

$$v_w = (1 - I_f) w_f ; \text{ para impactos negativos.} \quad (4)$$

Donde:

w_f : Factor de ponderación asignado a cada parámetro.

v_w : Valor ponderado del parámetro.

Finalmente, el indicador EAR queda dado por la Ecuación (5).

$$EAR = A w_A + B w_B + C w_C \quad (5)$$

Donde:

$w_{A,B,C}$: Factores de ponderación asignado para cada categoría (A, B y C).

A, B, C : Sumatoria de los valores ponderados correspondientes a cada categoría.

Una vez obtenido el indicador EAR, este se ajusta considerando otros parámetros complementarios, tales como la aparición de grietas asociadas al tráfico, la fatiga del pavimento y el ruido generado por el tránsito (Chiola et al., 2023).

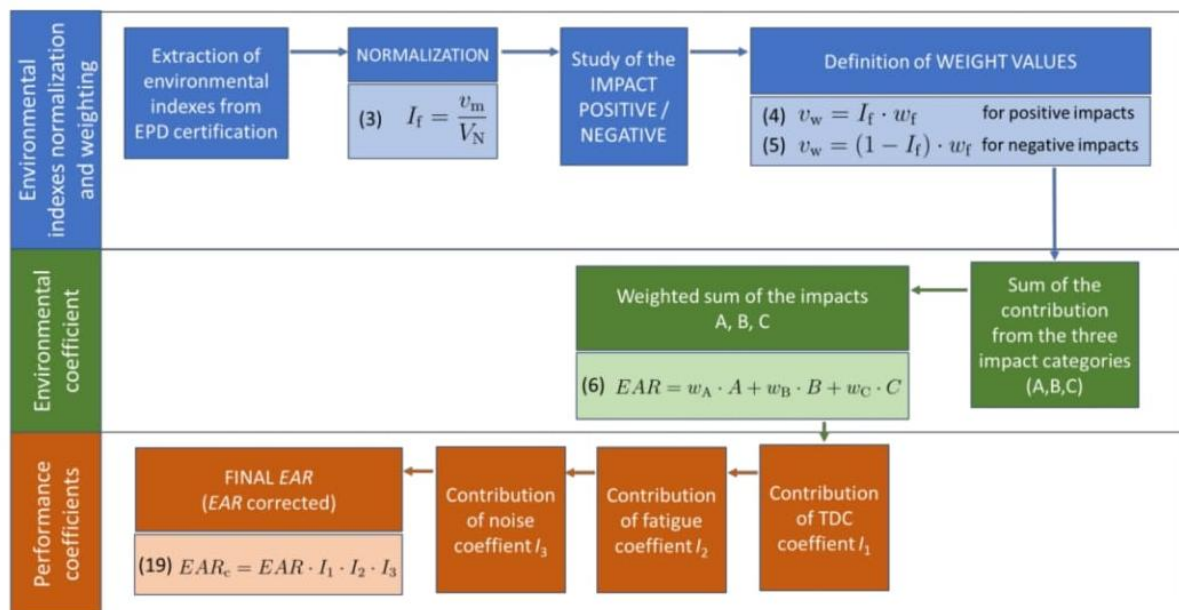


Figura 7 Metodología de cálculo de índice EAR (Chiola et al., 2023).



Otra forma de considerar los impactos ambientales en la optimización es mediante el coeficiente ambiental propuesto por Torres-Machí (2015), el cual actúa como un reductor en la función objetivo utilizada en la optimización desarrollada en esta tesis. El coeficiente ambiental β_{amb} considera las emisiones de CO_2 y se calcula según la Ecuación (6).

$$\beta_{amb} = (1 - w_{amb}) \frac{CO_{2sn} - CO_{2min}}{CO_{2max} - CO_{2min}} + \frac{CO_{2max} - CO_{2sn}}{CO_{2max} - CO_{2min}} \quad (6)$$

Donde:

w_{amb} : Factor que establece la importancia relativa asignada a las emisiones de CO_2 , cuyo valor varía entre 0 y 1.

CO_{2sn} : Emisiones al aplicar el tratamiento analizado.

CO_{2max} : Emisiones máximas entre todas las opciones de tratamiento consideradas.

CO_{2min} : Emisiones mínimas entre todas las opciones de tratamiento consideradas.

El coeficiente ambiental varía entre 0 y 1, donde el valor 1 corresponde a la actividad que genera la menor cantidad de emisiones o indica que no se otorgó importancia al parámetro ambiental durante el análisis ($w_{amb} = 1$).

5 Metodología

Como parte de los objetivos de esta memoria, se debe definir cómo se incorporará la sostenibilidad en el SGPA. Siguiendo lo propuesto por Tolmo (2020), se busca integrar el criterio ambiental en la etapa de optimización del proyecto, de modo que este influya en las actividades resultantes de dicha etapa.

Para abordar esta tarea, la propuesta se divide en dos componentes principales: en primer lugar, la cuantificación de los parámetros ambientales, es decir, las distintas emisiones y otros impactos de las diferentes actividades; y en segundo lugar, la selección y aplicación de los parámetros que serán considerados, asegurando la compatibilidad con la metodología de optimización que se está desarrollando para el sistema de gestión.

5.1 Propuesta de Cuantificación de Parámetros Medioambientales

Es necesario cuantificar los impactos o parámetros medioambientales para integrarlos adecuadamente, de modo que en la toma de decisiones se considere un plan de mantenimiento que promueva la sostenibilidad. Dado que actualmente no se dispone de datos medidos sobre las emisiones generadas durante actividades de M&R en los pavimentos estudiados, se opta por utilizar herramientas que permitan estimar estos impactos de manera sencilla y reproducible.

Para definir la herramienta que mejor se adapte a las necesidades del proyecto, se evaluaron distintos softwares según los siguientes criterios:

- **Disponibilidad de la herramienta:** La herramienta debe estar disponible actualmente para su implementación.
- **Base de datos:** La base de datos debe estar alineada al contexto del país o, en su defecto, debe ser flexible para poder adaptarla si es necesario.
- **Etapas analizadas:** Debe considerar, como mínimo, las etapas de construcción y mantenimiento dentro del ciclo de vida del pavimento.
- **Mantenimiento y actividades analizadas:** Si el software está diseñado específicamente para pavimentos, debe incluir los mantenimientos considerados por la DAP. Si es un programa genérico, debe permitir incorporar dichas actividades.



- **Impactos ambientales:** Como mínimo, debe incluir las emisiones de CO₂, en línea con los compromisos del país.
- **Facilidad de uso:** Se busca que la herramienta sea sencilla de usar y su interfaz sea amigable, para evitar problemas en la implementación de su aplicación al SGPA. Según lo indica Nathman et al. (2009) estas herramientas suelen ser complejas de utilizar lo que causa una limitación en su uso.
- **Costo:** Idealmente, se debe optar por un software gratuito o con un bajo costo para el usuario.

Con el objetivo de seleccionar la herramienta más adecuada, se evaluaron distintos softwares en función de los criterios mencionados. Entre las opciones consideradas se encuentran: PaLATE, GaBi, OpenLCA, Klimatkalkyl, Athena Pavement LCA, entre otras. En la Tabla 8 se presentan las principales ventajas y desventajas de las herramientas incluidas en esta evaluación comparativa. Además, en el Apéndice 1 se muestra más información de los softwares evaluados.

Tabla 8 Ventajas y desventajas de algunas herramientas analizadas.

Software	Ventajas	Desventajas
PaLATE V2.2	<ul style="list-style-type: none"> • Está diseñado para pavimentos. • Permite análisis de los pavimentos por capas. • Fácil de utilizar. • Calcula todas las actividades de forma simultánea. • Gratuito. • Base de datos editable. 	<ul style="list-style-type: none"> • Base de datos centrada en el contexto de EE. UU.
GaBi	<ul style="list-style-type: none"> • Amplia base de datos. • Permite adaptar la base de datos. 	<ul style="list-style-type: none"> • Requiere alta experiencia técnica. • No centrado en pavimentos. • La base de datos está mayormente orientada a gas y energía.
DuboCalc	-	<ul style="list-style-type: none"> • No permite agregar productos nuevos. • Solo representa el contexto neerlandés.
VTTI/UC	-	<ul style="list-style-type: none"> • Datos enfocados en EE. UU. • No disponible.
Ecorce-M	-	<ul style="list-style-type: none"> • No disponible por problemas de seguridad.
asPECT	<ul style="list-style-type: none"> • Diseñado para pavimentos. 	<ul style="list-style-type: none"> • Solo aplicable a pavimentos flexibles
Athena Pavement LCA	<ul style="list-style-type: none"> • Diseñado para pavimentos. 	<ul style="list-style-type: none"> • No se puede modificar datos. • Base de datos para algunas ciudades de E.E. U.U.
Ecochain	<ul style="list-style-type: none"> • Amplia base de datos. • Modelado flexible. 	<ul style="list-style-type: none"> • Manejo complejo. • Requiere conocimientos en Análisis del Ciclo de Vida (ACV). • No específico para pavimentos.



Tabla 8 Ventajas y desventajas de algunas herramientas analizadas (continuación).

Software	• Ventajas	• Desventajas
GreenDOT	<ul style="list-style-type: none"> • Permite analizar emisiones en distintos escenarios de tráfico. • Basado en Excel, fácil de usar. 	<ul style="list-style-type: none"> • Solo estima CO₂ y GWP. • No adaptable fácilmente. • Representativo solo de EE. UU.
Klimatkalkyl	<ul style="list-style-type: none"> • Plataforma web. • Plantillas útiles para M&R, aunque no específicas para aeropuertos. 	<ul style="list-style-type: none"> • Disponible solo en sueco.
LCC AM-QM	<ul style="list-style-type: none"> • Evaluación completa del ciclo de vida económico. • Puede conectarse con sistemas de mantenimiento existentes. 	<ul style="list-style-type: none"> • No incluye evaluación ambiental. • Interfaz compleja. • Requiere muchos datos.
LCCA original and eSpress	<ul style="list-style-type: none"> • Cálculo del ciclo de vida económico. • Dos versiones disponibles (básica y completa). • Interfaz sencilla enfocada en pavimentos. 	<ul style="list-style-type: none"> • Solo cumple directrices de EE. UU. • No considera criterios ambientales.
LCE4ROADS	-	<ul style="list-style-type: none"> • No disponible.
LICCER	<ul style="list-style-type: none"> • Interfaz sencilla. • Enfocado en infraestructura. • Incluye ejemplos prácticos. 	<ul style="list-style-type: none"> • Difícil de conseguir. • No incluye base de datos propia. • Resultados no comparables entre estudios.
OpenLCA	<ul style="list-style-type: none"> • Amplia base de datos. • Herramientas para análisis de incertidumbre (Monte Carlo, matriz de pedigrí). • Modelado visual o sistemático. 	<ul style="list-style-type: none"> • No específico para pavimentos. • Requiere muchos datos. • Problemas para para ejecutarlo en Windows.
Real Cost LCCA - FHWA	<ul style="list-style-type: none"> • Cálculo de ciclo de vida económico. • Interfaz sencilla. • Incluye análisis de incertidumbre. 	<ul style="list-style-type: none"> • Solo cumple directrices de EE.UU. • No considera criterios ambientales.
Système d'Evaluation des Variantes Environnementales (SEVE)	<ul style="list-style-type: none"> • Útil para comparar propuestas en licitaciones. • Fácil de usar. • Avalado por Deloitte e IDRRIM. 	<ul style="list-style-type: none"> • Solo analiza fase de construcción. • Requiere conexión a internet.
SimaPro	<ul style="list-style-type: none"> • Múltiples metodologías. • Disponible en varios idiomas. • Estimación de incertidumbre integrada. 	<ul style="list-style-type: none"> • Interfaz compleja. • Usuario debe modelar todo el sistema. • No centrado en pavimentos.
SMART SPP	-	<ul style="list-style-type: none"> • Vínculo caído.



Tabla 8 Ventajas y desventajas de algunas herramientas analizadas (continuación).

Software	Ventajas	• Desventajas
Emerald EPD tool	-	<ul style="list-style-type: none"> • Representativo solo de EE. UU. • Difícil acceso. • Solo mide emisiones atmosféricas. • No cubre uso ni fin de vida.
Oneclick LCA	-	<ul style="list-style-type: none"> • Enfocado en construcción y manufacturación.
FAA PAVEAIR	-	<ul style="list-style-type: none"> • No considera criterio medio ambiental.
LCA-AIR 1.0	-	<ul style="list-style-type: none"> • No disponible.
LCA-PAVE tool	-	<ul style="list-style-type: none"> • Problemas al ejecutar.

Algunos programas fueron descartados, ya que presentan limitaciones relevantes para su aplicación en este estudio. En particular, VTTI/UC, SMART SPP, LCA-AIR 1.0 y LCE4ROADS no se encuentran actualmente disponibles. Además, FAA PAVEAIR se excluyó porque no considera criterios medioambientales en su análisis.

A partir del análisis comparativo de las herramientas revisadas, se concluye que PaLATE (Pavement Life-cycle Assessment Tool for Environmental and Economic Effects) es la alternativa que mejor se ajusta a los criterios definidos en este estudio.

5.1.1 PaLATE

PaLATE (Pavement Life-cycle Assessment Tool for Environmental and Economic Effects) es una herramienta desarrollada por el Consortium for Green Design and Manufacturing de la Universidad de California, Berkeley. Su objetivo es evaluar los impactos ambientales y económicos asociados a la construcción y a las actividades de M&R de carreteras de Estados Unidos. Para ello, considera los materiales y procesos utilizados en las distintas etapas del ciclo de vida de los pavimentos (Recycled Materials Resource Center University of Wisconsin-Madison, 2025).

La herramienta consiste en un archivo en formato Microsoft Excel, lo que facilita su uso e implementación. Además, permite modificar la base de datos, lo que brinda la posibilidad de adaptarla al contexto chileno para su uso en aplicaciones futuras.

PaLATE funciona siguiendo un enfoque de Análisis del Ciclo de Vida (ACV) (Nathman et al., 2009), el cual consiste en analizar únicamente los efectos ambientales (Tisberger Ibañez, 2019). Esto considera desde la producción de los materiales, su uso, transporte y disposición final (Consoli et al., 1993).

Dado que el ACV solo contempla una categoría, suele utilizarse en conjunto con otras metodologías. Para su aplicación, generalmente se emplean datos provenientes de políticas nacionales o de bases de datos adaptadas al contexto de análisis (Nathman et al., 2009).

Este enfoque se centra en el análisis de los materiales y la energía utilizada en una actividad o producto (Santos et al., 2017). En la Figura 8 se presenta un esquema general del proceso.

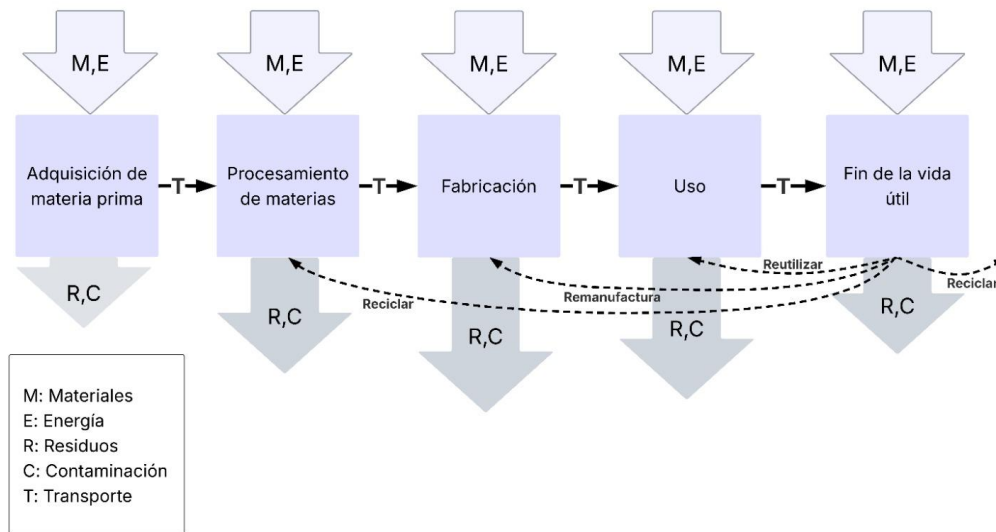


Figura 8 Diagrama de metodología ACV (Kendall & Santero, 2010).

Los datos de entrada (inputs) de esta metodología son los materiales y la energía, incluyendo información relevante como el transporte involucrado en cada etapa del ciclo de vida del producto. A partir de estos datos, se estima la contaminación generada y los residuos producidos en cada uno de los procesos, con el objetivo de utilizar los resultados como apoyo en la gestión de los procesos de productos o actividades (Kendall & Santero, 2010).

El ACV es utilizado por varias herramientas de estimación de emisiones para evaluar el impacto ambiental de los pavimentos. En el caso de PaLATE, este análisis excluye algunas etapas del ciclo de vida (Nathman et al., 2009). Como se muestra en la Figura 9, la etapa de uso/operación no se analiza en este software, ni tampoco la correspondiente al fin del ciclo de vida.

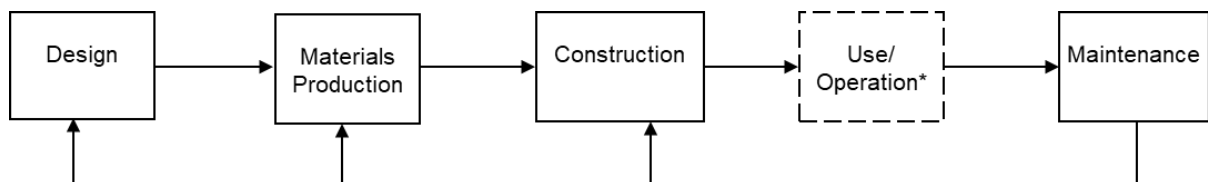


Figura 9 Etapas analizadas por PaLATE (Consortium on Green Design and Manufacturing Universidad de California Berkeley, 2004).

Desde el punto de vista económico, PaLATE incorpora el Análisis del Costo del Ciclo de Vida (ACCV), el cual permite una evaluación centrada en los costos del ciclo de vida de los pavimentos. Este análisis puede ser del tipo probabilístico o determinístico, considerando tanto los costos directos como los indirectos, aunque excluye los costos asociados a los usuarios y las actividades que previenen el deterioro futuro del pavimento (Babashamsi et al., 2016). Sin embargo, esta función de la herramienta no será considerada en el SGPA, ya que será abordada como un criterio dentro de la etapa de optimización.

Esta herramienta opera a partir de inputs y genera resultados (outputs), los cuales se resumen en la Tabla 9.



Tabla 9 Datos de ingreso y resultados entregados por PaLATE (Recycled Materials Resource Center University of Wisconsin-Madison, 2025).

Input	Output
<ul style="list-style-type: none"> - Diseño inicial (estructura del pavimento y dimensiones) - Materiales de construcción inicial - Materiales y procesos de mantenimiento - El equipo 	<ul style="list-style-type: none"> -Efectos medio ambientales <ul style="list-style-type: none"> • Consumo de energía (MJ) • Consumo de agua (kg) • Dióxido de carbono (CO_2) (Mg) • Óxido nítrico NO_x (kg) • Material particulado (PM10) • Dióxido sulfúrico SO_2 • Monóxido de carbón CO (kg) • Mercurio Hg (g) • Plomo Pb (g) • Residuos peligrosos generados (kg) • Toxicidad potencial (HTP, cancerígenos y no cancerígenos) (g) -Costos

Para utilizar PaLATE, se deben ingresar los datos presentados en la tabla anterior en las hojas correspondientes del archivo. Es importante considerar que las hojas posteriores a la hoja denominada “Data” constituyen la base de datos del software, la cual no será modificada en el marco de esta memoria. Por lo tanto, los resultados obtenidos deben considerarse únicamente como referenciales y no definitivos.

La Figura 10 presenta de forma general el proceso de análisis realizado por la herramienta. En primer lugar, se debe definir el tipo de proyecto a evaluar, lo cual permite seleccionar la hoja adecuada para el ingreso de datos. Luego, se ingresa la estructura del pavimento por capas, utilizando las unidades indicadas en la tabla respectiva. Posteriormente, se incorpora la información correspondiente a las etapas seleccionadas para el análisis, ingresando los volúmenes de materiales y procesos, así como las distancias de transporte. El software realiza un análisis ambiental de cada material, proceso y etapa de transporte, entregando como resultado un inventario estimado de impactos ambientales asociados a cada componente evaluado.

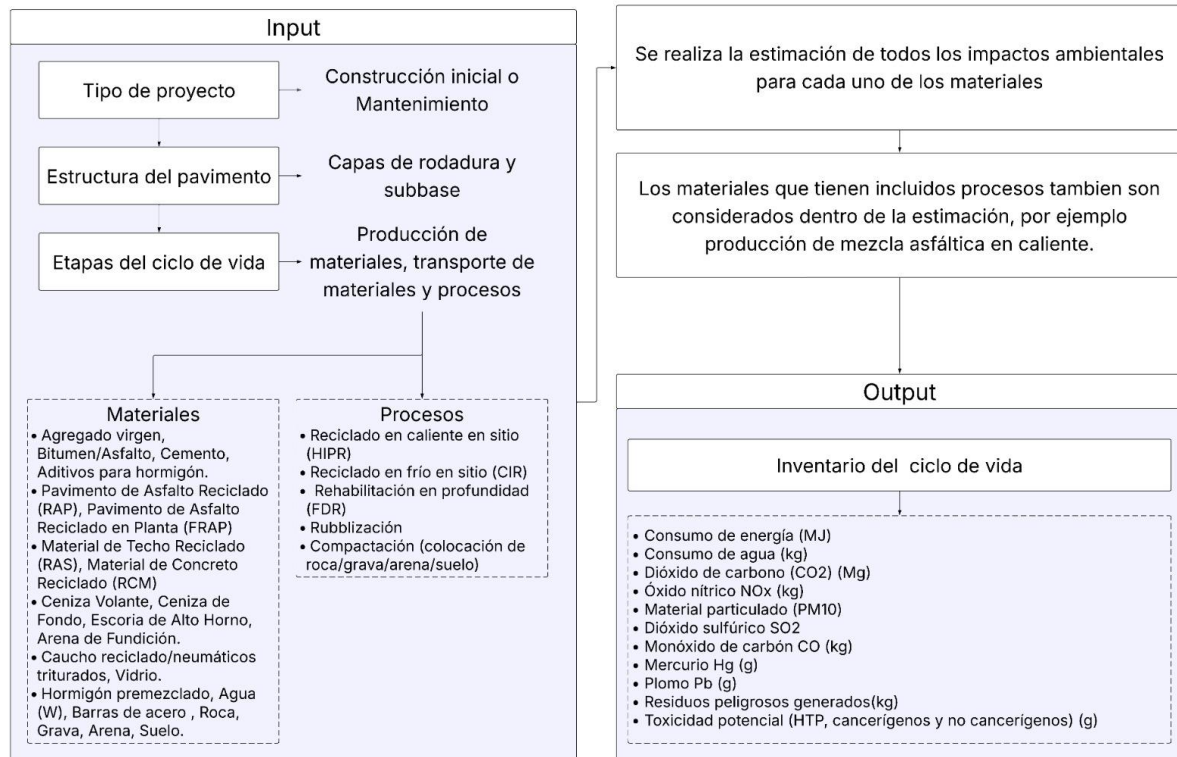


Figura 10 Proceso de estimaciones ambientales realizadas por PaLATE (Nathman et al., 2009).

5.2 Propuesta Criterio Ambiental

Según lo mencionado en la sección 4.4, y en relación con los objetivos establecidos por Chile para reducir las emisiones de dióxido de carbono (CO₂) en el sector de obras civiles (Valencia et al., 2021), este impacto ha sido seleccionado como el principal parámetro ambiental a considerar en esta investigación.

Para ello, se consideraron tres alternativas: la incorporación de un precio monetario por tonelada de CO₂ emitida, el uso del índice EAR y el coeficiente ambiental propuesto por Torres-Machí (2015).

No obstante, dado que en esta investigación no se cuenta con datos medidos de los parámetros ambientales, la aplicación de este índice se verá limitada, como establece Chiola et al. (2023). Por esta razón, se propone la siguiente adaptación.

5.2.1 Índice EAR Simplificado

Dado que todos los parámetros considerados en este estudio fueron estimados, y su número es menor que los originalmente evaluados en el índice EAR, no se aplica la categorización por niveles establecida en la metodología original, como se muestra en la Figura 11.

Con respecto a los ponderadores, se considerarán todos con el mismo peso, excepto el consumo de combustibles fósiles y las emisiones de gases de efecto invernadero. Estos parámetros, en línea con el objetivo de reducir las emisiones de CO₂ en la operación aérea, tendrán mayor relevancia que los demás.

Además, los pesos asignados a los parámetros de este índice se definieron de dos formas distintas: considerando directamente las emisiones y asignando ponderaciones por grupos de impacto durante el análisis.

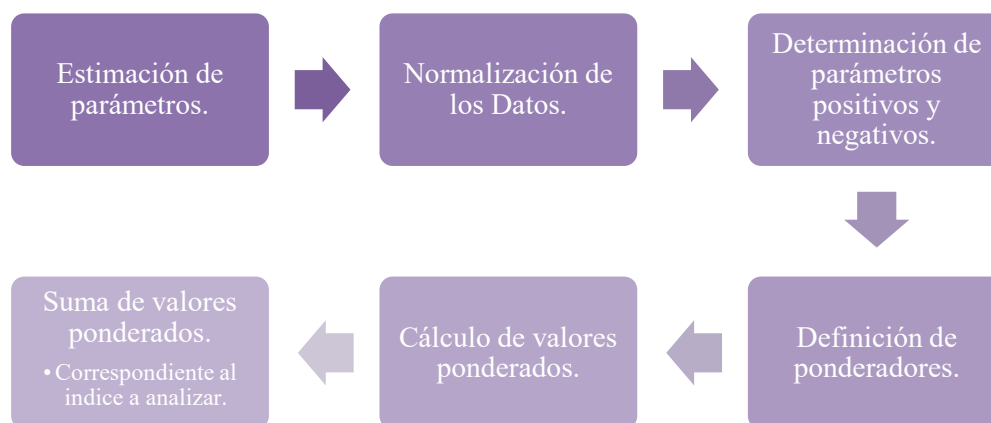


Figura 11 Esquema propuesta del índice modificado.

5.2.2 Comparación de Alternativas

Para comparar los métodos mencionados anteriormente, se consideraron estimaciones de las emisiones generadas por las operaciones de las siguientes actividades: pavimentación con mezcla asfáltica en caliente (MAC), reciclado en caliente in situ, reciclado en frío in situ y reciclaje total de la profundidad del pavimento. Estas actividades fueron aplicadas a la plataforma de asfalto PL-2 del aeródromo de La Florida. La estructura analizada consiste en una capa asfáltica de 10 [cm], una base granular de 40 [cm] y una subbase de 10 [cm].

Las emisiones fueron estimadas usando el software PaLATE, considerando que los tratamientos se aplicaban en la sección completa PL-2. En la Tabla 10 se presentan las estimaciones obtenidas, las cuales fueron analizadas mediante cada uno de los métodos de comparación.

Tabla 10 Estimación emisiones sección Pl-2 del aeródromo de La Florida.

	Energía [MJ]	Consumo de agua [g]	CO ₂ [kg]	NO _x [g]	PM-10 [g]	SO ₂ [g]	CO [g]	Hg [g]	Pb [g]	Residuos Peligrosos Generados según RCRA [g]
Pavimentación con mezcla asfáltica en caliente (MAC)	5.276	898	396	9.232	661	611	1.989	0	0.18	38.014
Reciclado en caliente in situ	11.385	537	237	6.006	426	397	1.294	0	0.11	22.741
Reciclado en frío in situ / Fresado en frío	1.602	273	120	2.782	197	184	599	0	0.05	11.545
Reciclaje total de la profundidad del pavimento	316	54	24	605	43	40	130	0	0.01	2.28

A partir de este análisis se obtuvieron los resultados presentados en la Figura 12. En ella, el eje izquierdo muestra los índices y el eje derecho presenta los costos asociados a las emisiones. En los cuatro casos analizados de criterios, se obtuvieron resultados coincidentes respecto a cuáles tratamientos son más amigables con el medio ambiente.

Cabe señalar que el índice propuesto por Torres-Machí (2015) presenta una tendencia inversa respecto de los demás criterios: a mayor emisión, menor es el valor del índice; y a menor índice, mayor es la contaminación. Esto se debe a que este índice está definido como un mecanismo de penalización para las actividades, de modo que un valor más cercano a 1 implica una menor penalización en la evaluación.

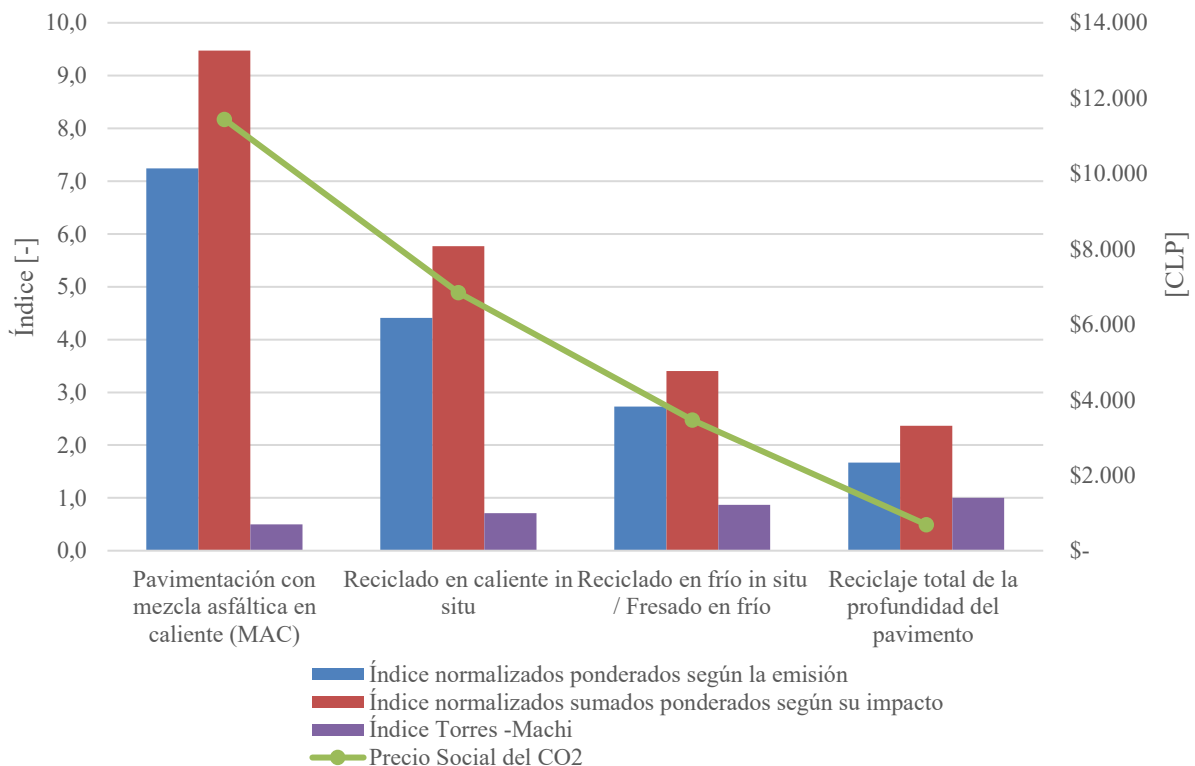


Figura 12 Comparación de métodos caso ejemplo plataforma PL-2.

A partir de este análisis, se identificaron una serie de ventajas y desventajas asociadas al uso de cada uno de los criterios analizados, las cuales se resumen en la Tabla 11. Para ello, se consideraron aspectos como la adaptabilidad y la facilidad de incorporación del criterio ambiental en el sistema de gestión, así como la necesidad de que este se alinee con los compromisos establecidos a nivel nacional. En función de lo anterior, se propone la utilización del Precio Social del Carbono como parte de los criterios a incorporar en la etapa de optimización del SGPA.

Se propone aplicar este criterio en dicha etapa, ya que el método seleccionado corresponde a un costo directamente asociado a la actividad de mantenimiento, el cual será integrado como uno de los criterios dentro del proceso de optimización. Por esta razón, no resulta pertinente incluirlo como parte del análisis en la etapa de priorización.



Tabla 11 Ventajas y desventajas de los métodos.

	Comparación unidad monetaria	Índice medio ambiental EAR	Coefficiente ambiental propuesto por Torres-Machí
N° máximo de parámetros	1	Se pueden agregar los parámetros que se requieran.	1
Ventajas	<ul style="list-style-type: none"> • Fácil de comparar con otros criterios, por ejemplo, el económico. • Compatible con la optimización del sistema, ya que puede ser incluida como parte del costo. 	<ul style="list-style-type: none"> • Puede considerar un gran número de parámetros. • Se pueden establecer diferentes ponderaciones para los impactos. • Es adaptable, se pueden agregar y eliminar parámetros con facilidad. 	<ul style="list-style-type: none"> • Fácil de aplicar a la etapa de optimización, si se utiliza la metodología propuesta por Torres-Machí (2015).
Desventajas	<ul style="list-style-type: none"> • La cantidad de parámetros que se pueden analizar es limitada, depende de actualizaciones del gobierno. 	<ul style="list-style-type: none"> • Requiere una mayor cantidad de información. • Requiere apoyo de expertos para definir los ponderadores. • Debe ser incluido en la optimización como un criterio extra, lo que puede generar complicaciones. 	<ul style="list-style-type: none"> • Solo considera un parámetro ambiental. • Requiere apoyo de expertos para definir el ponderador asociado a este criterio.

5.3 Resumen Propuesta Criterio Medio Ambiental

Finalmente, se propone la incorporación de un criterio ambiental cuantitativo en el proceso de optimización del SGPA, con el objetivo de integrar la sostenibilidad en la selección de tratamientos. Este criterio se basa en la estimación de emisiones de CO₂ asociadas a las distintas actividades y en su valorización mediante el Precio Social del Carbono.

La metodología contempla el uso de la herramienta PaLATE, la cual permite estimar las emisiones generadas y expresarlas en términos monetarios a través del Precio Social del Carbono. Este valor se integra como un criterio en la etapa de optimización del SGPA, junto a los criterios técnicos y económicos ya existentes.

En la Figura 13 se presenta un resumen esquemático del proceso propuesto para integrar el criterio ambiental. Esta metodología ha sido diseñada para ser replicable y adaptable, lo que permite su aplicación a distintos aeropuertos de la red primaria nacional.

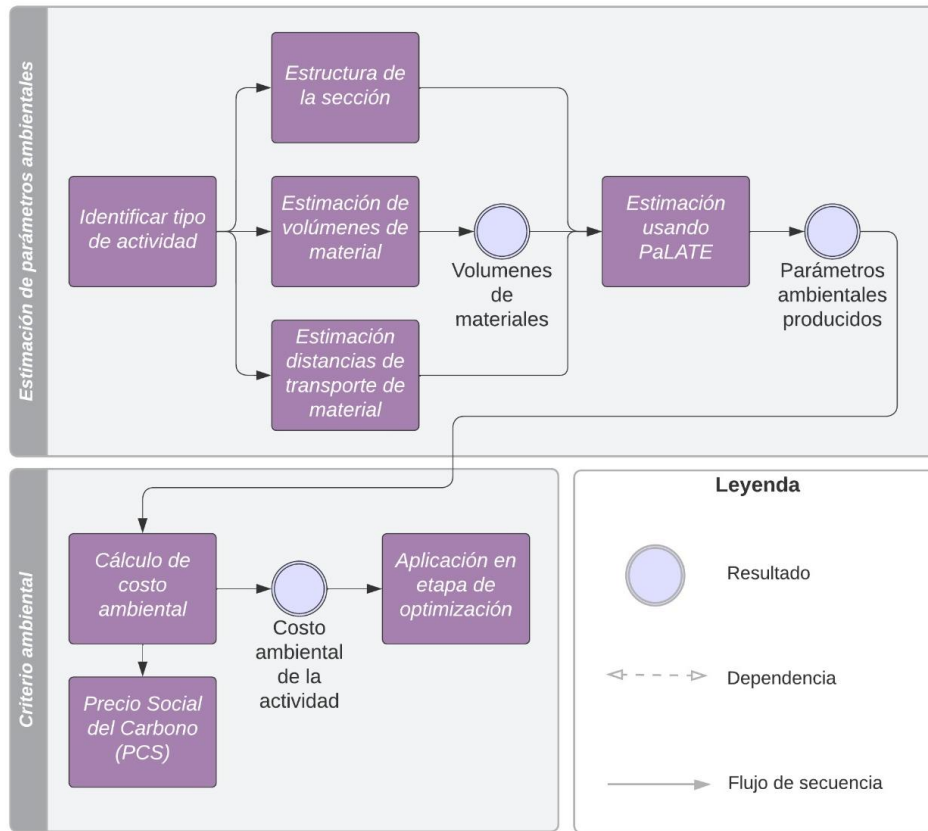


Figura 13 Resumen propuesta integración de criterio ambiental.

6 Caso de Estudio: Aeropuerto de La Florida

La herramienta y el criterio propuestos anteriormente serán aplicados a las distintas secciones del aeropuerto de La Florida. Para esto, se seguirá el procedimiento descrito en el Apéndice 2.

Este aeródromo se ubica en la Región de Coquimbo, a 6 [km] del centro de la ciudad de La Serena. Está conformado por una pista, rodajes y plataformas, las cuales se muestran en la Figura 14, donde se indican las distintas secciones que fueron consideradas en este análisis (FERRER y Asociados Ingenieros Consultores, 2024).

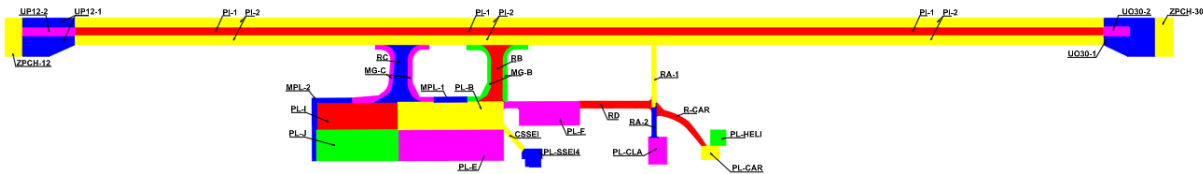


Figura 14 Aeródromo de La Florida con sus secciones (FERRER y Asociados Ingenieros Consultores, 2024).



6.1 Estimación de Volúmenes

Uno de los principales datos de entrada corresponde a los volúmenes estimados de los materiales utilizados en cada una de las actividades. Sin embargo, no se cuenta con información de proyectos ejecutados previamente que permita obtener estos valores directamente. Por ello, los volúmenes serán estimados a partir de lo definido en las distintas Especificaciones Técnicas Generales (ETG) de la DAP.

En dichas especificaciones, las cantidades de materiales se presentan comúnmente en unidades de masa, mientras que el software PaLATE requiere el ingreso de datos en unidades de volumen. Para realizar esta conversión, se utilizarán las densidades referenciales proporcionadas por el propio software, las cuales se presentan en la Tabla 22 (disponible en el Apéndice 3). Asimismo, las dimensiones y estructuras de pavimentos a utilizar serán aquellas definidas en la Tabla 23 (presentada en el Apéndice 3), donde se presentan las capas y espesores asumidos para esta aplicación.

Dado que se trata de una estimación, se establecieron de supuestos técnicos basados en lo indicado en las ETG, los cuales se detallan a continuación en la Tabla 12, según el tipo de actividad evaluada:

Tabla 12 Consideraciones y supuestos para cálculo de volumen de materiales (A: pavimento asfáltico y H: pavimento de hormigón).

Actividad	Materiales	Espesor asumido	Observaciones / Fuente
Bacheo profundo (A)	Bitumen, agregado virgen, grava, arena.	Capa asfáltica completa y base.	<ul style="list-style-type: none"> Se consideró que se interviene la capa superficial y la base. Se utilizó un contenido de bitumen del 6,25% en peso, valor promedio del rango aceptado por Dirección de Aeropuertos (2024a). Se asumió una proporción de 45% de agregado fino y 55% de agregado grueso, según Dirección de Aeropuertos (2014b)
Bacheo superficial (A)	Bitumen, agregado virgen.	Capa asfáltica completa	<ul style="list-style-type: none"> Mismas consideraciones que para el bacheo profundo.
Bacheo espesor total (H)	Cemento, agua, agregado virgen.	Espesor total de la losa.	<ul style="list-style-type: none"> Se consideraron las proporciones de mezcla de concreto definidas por Dirección de Aeropuertos (2016), suponiendo el uso de piedra triturada.
Bacheo espesor parcial (H)	Cemento, agua, agregado virgen.	Espesor medio de la losa.	<ul style="list-style-type: none"> Mismas consideraciones que para la actividad anterior.
Reemplazo de losa (H)	Cemento, agua, agregado virgen.	Espesor total de la losa.	<ul style="list-style-type: none"> Mismas consideraciones que para la actividad anterior. Se toman en cuenta las dimensiones reales de las losas según la sección intervenida.
Tratamiento superficial bituminoso múltiple (A)	Bitumen, agregado virgen, emulsión.	No depende del espesor.	<ul style="list-style-type: none"> Se consideró las tres capas como se menciona la Dirección de Aeropuertos (2017). Se consideró solamente los materiales en el análisis.



Tabla 12 Consideraciones y supuestos para cálculo de volumen de materiales (A: pavimento asfáltico y H: pavimento de hormigón) (continuación).

Actividad	Materiales	Espesor asumido	Observaciones / Fuente
Tratamiento superficial bituminoso múltiple (A)	Bitumen, agregado virgen, emulsión.	No depende del espesor.	<ul style="list-style-type: none"> Se consideró las tres capas como se menciona la Dirección de Aeropuertos (2017). Se consideró solamente los materiales en el análisis.
Sello de grietas (A)	Bitumen, emulsión.	Espesor de 20 [mm], se supuso el límite de uso de material de respaldo establecido por Dirección de Aeropuertos (n.d.).	<ul style="list-style-type: none"> Se consideró la clasificación de grietas según su ancho, tomado en cuenta el promedio del rango (Grietas finas ancho de 3 [mm], pequeñas 13 [mm] y medianas 45 [mm]) (Dirección de Aeropuertos, n.d.). No se consideró las grietas mayores ya que su tratamiento corresponde a bacheo (Dirección de Aeropuertos, n.d.).
Riego de sello o Fog seal (A)	Emulsión.	No depende del espesor.	<ul style="list-style-type: none"> Se considero una aplicación de 0.75 [lt/m²], según indica Dirección de Aeropuertos (2013a) No se consideró el agua como material, ya que no se indica cantidad ni proporciones (Dirección de Aeropuertos, 2013a).
Lechada asfáltica o Slurry seal (A)	Emulsión, agregado virgen.	No depende del espesor.	<ul style="list-style-type: none"> Se supuso una granulometría Tipo I, ya que se indicó que puede ser considerada en gran parte de los proyectos (Dirección de Aeropuertos, 2014a). Se supuso que el asfalto residual de la emulsión corresponde al 60% como menciona Mercado et al. (2008). Solo se consideró el material en la estimación.

Además, de manera general se asumirán las siguientes distancias de transporte para los materiales:

- Bitumen y emulsión asfáltica: 5 [km], considerando la ubicación de la planta de la empresa Bitumix.
- Áridos: 25 [km], la distancias dentro de la que se ubican los seis centros de materiales más cercanos al aeródromo.
- Cemento: 25 [km], correspondiente a la distancia de los proveedores más cercanos identificados.

6.2 Estimación de Parámetros Ambientales

Para evaluar el impacto ambiental de las alternativas de intervención, se estimaron las emisiones de CO₂ utilizando la herramienta PaLATE. Los resultados obtenidos se presentan en el Apéndice 4, como parte del análisis aplicado al caso de estudio. Tal como se definió en la propuesta del criterio ambiental, las emisiones de CO₂ fueron seleccionadas como el único parámetro ambiental de evaluación, en concordancia con los objetivos de sostenibilidad establecidos.

A continuación, se presentan los resultados de emisiones de CO₂ asociadas a las actividades de mantenimiento en pavimentos asfálticos. En la Figura 15 se comparan las emisiones generadas por el bacheo profundo y el bacheo superficial en distintas secciones del aeropuerto. Se evidencia que el bacheo profundo genera, en general, mayores emisiones por unidad de superficie tratada, debido a que implica la intervención de capas más profundas de la estructura del pavimento.

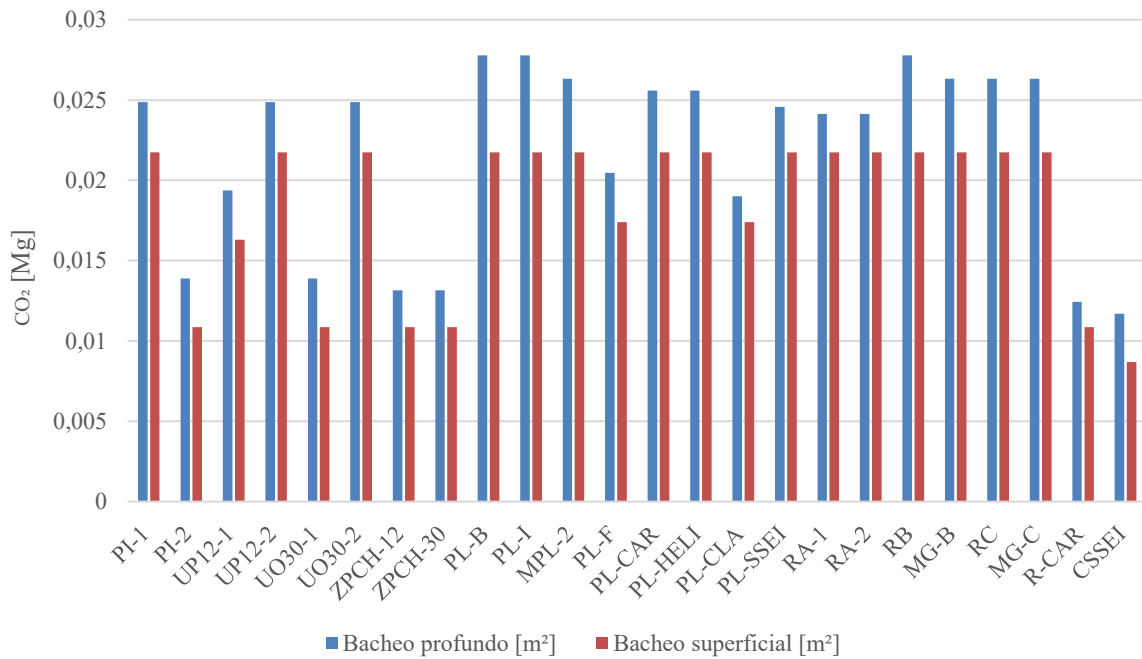


Figura 15 Emisiones de CO₂ estimadas para pavimentos asfálticos considerando 1 [m²] de tratamiento.

Con el fin de analizar la influencia de la profundidad del tratamiento sobre las emisiones generadas, se evaluaron distintos escenarios para una sección representativa del pavimento asfáltico. En el caso del bacheo superficial, se utilizó la sección PI-2 y se analizaron diferentes profundidades dentro del espesor total de la capa tratada. Los resultados permitieron identificar una relación directamente proporcional entre la profundidad del tratamiento y las emisiones generadas, lo que permitió ajustar una función lineal (Figura 16). Esta relación facilita la estimación de emisiones en otras secciones con características estructurales equivalentes.

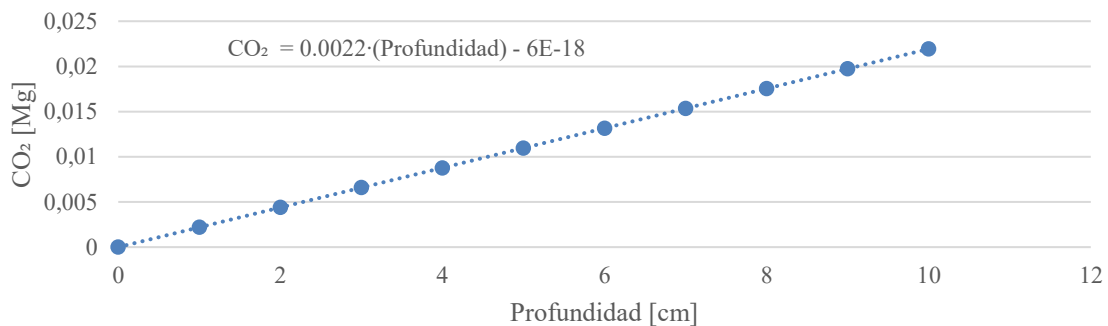


Figura 16 Variación de las emisiones para un bacheo superficial en la sección PI-2, en función de la profundidad del tratamiento.

En el caso del bacheo profundo, se utilizó la sección PI-1 como referencia. Para este tratamiento, se estimaron por separado las emisiones correspondientes a la capa superficial y a la base, considerando diferentes profundidades posibles dentro del espesor total de cada una. A partir de estos resultados, se ajustaron dos funciones lineales independientes que permiten estimar las emisiones asociadas a cualquier profundidad de intervención, sin necesidad de repetir el proceso completo de simulación. Las relaciones obtenidas se presentan en la Figura 17 y la Figura 18.

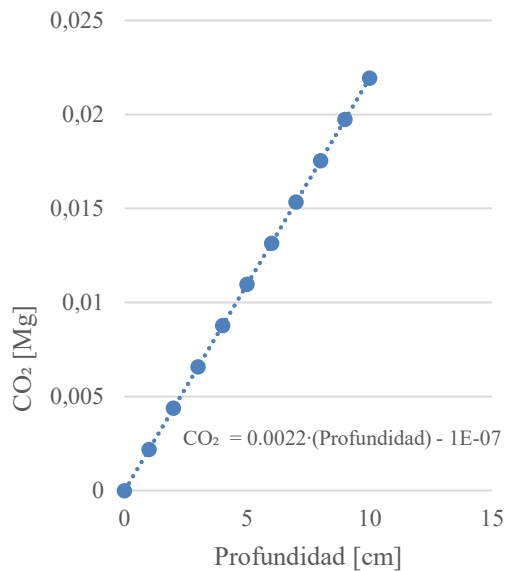


Figura 17 Variación de las emisiones para la capa superficial de un bacheo profundo en la sección PI-1, variando la profundidad del tratamiento.

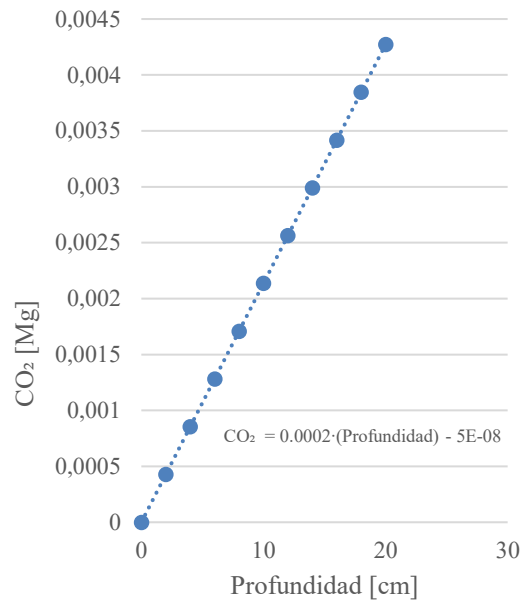


Figura 18 Variación de las emisiones para la base de un bacheo profundo en la sección PI-1, variando la profundidad del tratamiento.

En cuanto al tratamiento superficial bituminoso múltiple (TSM), la Figura 19 presenta las emisiones de CO₂ estimadas considerando una unidad de aplicación de 1 [m²]. Según lo indicado por la Dirección de Aeropuertos (2017), tanto la primera como la segunda capa del TSM pueden ejecutarse utilizando cemento asfáltico o emulsión asfáltica, dependiendo de las condiciones del proyecto. Por esta razón, se estimaron las emisiones para ambos escenarios.

Las estimaciones realizadas son aplicables a cualquier tipo de estructura de pavimento, ya que este tratamiento se aplica exclusivamente sobre la capa superficial.

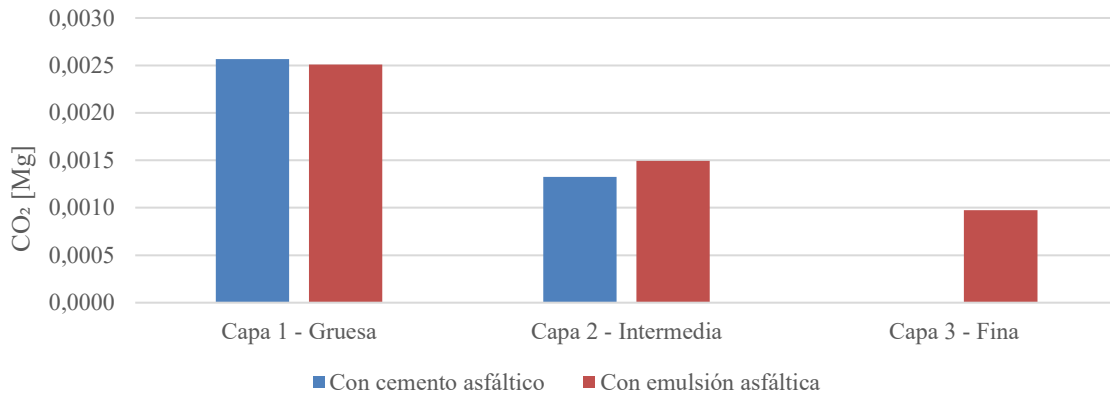


Figura 19 Emisiones de CO₂ estimadas para tratamiento superficial bituminoso múltiple (TSM) considerando 1 [m²] de aplicación.

En el caso del sello de grietas en pavimentos asfálticos, se analizaron dos alternativas de material de relleno: bitumen y emulsión asfáltica. Los resultados obtenidos se presentan en la Figura 20, considerando grietas de 1 [m] de longitud. Se observa que el uso de bitumen genera emisiones levemente superiores en comparación con la emulsión.

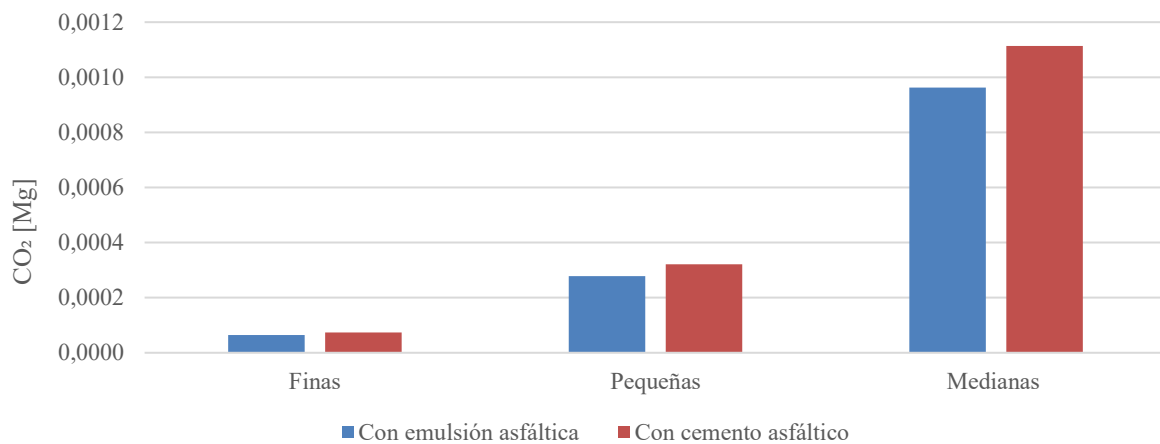


Figura 20 Emisiones de CO₂ estimadas para sello de grietas en pavimentos asfálticos, considerando 1 [m] de longitud de grieta.

Respecto al riego de sello asfáltico (fog seal), se utilizaron los rangos de aplicación definidos por la Dirección de Aeropuertos (2013a) como base para esta estimación, obteniendo un resultado de 0.00079 [Mg CO₂/m²]. En cuanto a la lechada asfáltica (slurry seal), se utilizó un valor típico mencionado en la ETG. A partir de ello, se obtuvo una emisión estimada de 0.00107 [Mg CO₂/m²] para una unidad de superficie equivalente.

En el caso de los pavimentos rígidos, se estimaron las emisiones asociadas a tres tipos de intervenciones: bacheo de espesor total, bacheo de espesor parcial y reemplazo completo de losa. La Figura 21 muestra las emisiones generadas por el bacheo en dos secciones distintas (PL-E y PL-J), evidenciando que el tratamiento de espesor total genera aproximadamente el doble de emisiones que el de espesor parcial, debido al mayor volumen de hormigón requerido.

Por su parte, la Figura 22 presenta las emisiones asociadas al reemplazo completo de una losa en ambas secciones analizadas. Este tratamiento corresponde a la alternativa con mayor impacto ambiental dentro

del grupo de intervenciones sobre pavimentos de hormigón, con emisiones cercanas a 1.8 [Mg CO₂/m²] por losa.

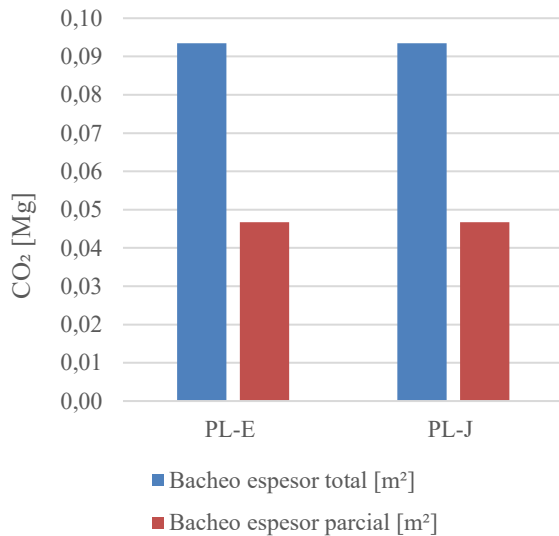


Figura 21 Emisiones de CO₂ estimadas para pavimentos rígidos considerando 1 [m²] de tratamiento.

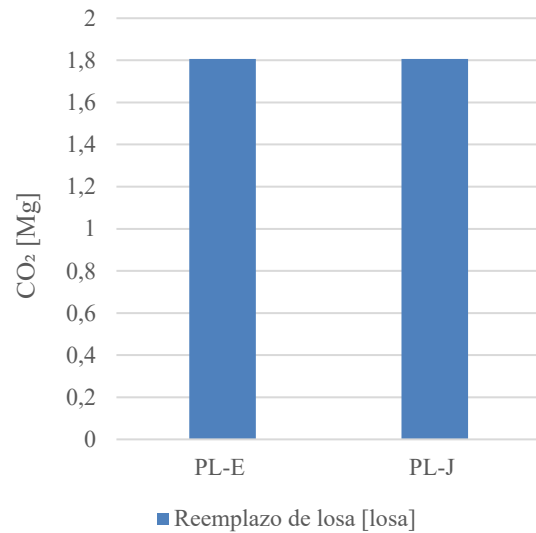


Figura 22 Emisiones de CO₂ estimadas para pavimentos rígidos considerando el tratamiento en una losa.

Adicionalmente, se analizó la influencia de la profundidad del tratamiento en el caso del bacheo de espesor parcial. Para ello, se utilizó la sección PL-E como referencia y se evaluaron distintos escenarios dentro del espesor total de la losa. Los resultados obtenidos se muestran en la Figura 23, donde se observa una relación lineal entre la profundidad del tratamiento y las emisiones generadas. Esta relación permitió ajustar una ecuación lineal que puede ser utilizada para estimar las emisiones en otras secciones con características estructurales similares, sin necesidad de repetir el análisis completo.

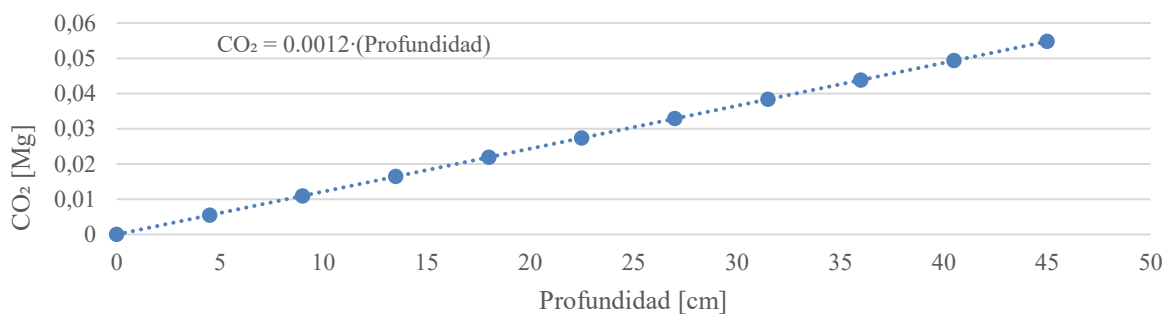


Figura 23 Variación de las emisiones para un bacheo espesor parcial en la sección PL-E, variando la profundidad del tratamiento.



6.3 Costos monetarios

Una vez estimadas las emisiones de CO₂ asociadas a los distintos tratamientos de mantenimiento, estas deben transformarse a unidades monetarias para facilitar su integración en el proceso de optimización del SGPA. Para ello, se utiliza el PSC, expresado en [UF/tCO₂], asegurando así la compatibilidad con el resto de los parámetros económicos del proyecto.

En este estudio, se consideró el valor definido para el año 2024, equivalente a 1.52 [UF/tCO₂] según lo establecido por la División de Evaluación Social de Inversiones (2024), con base en la metodología de Cid et al. (2024).

A continuación, se presentan los costos económicos asociados a las emisiones de CO₂ generadas por los distintos tratamientos evaluados.

La Tabla 13 presenta los costos económicos asociados a las emisiones de CO₂ para las actividades de bacheo profundo y superficial en pavimentos asfálticos. Se observa una considerable variación entre secciones, atribuida principalmente a las diferencias estructurales del pavimento, que afectan el volumen de material intervenido y, por ende, la magnitud de las emisiones. En todos los casos, el bacheo profundo presenta mayores costos asociados al impacto ambiental debido a la intervención de capas de mayor espesor.

Tabla 13 Costos por emisiones de CO₂ para pavimentos asfálticos.

Sección	Bacheo profundo [UF/m ²]	Bacheo superficial [UF/m ²]
PI-1	0.03765	0.03313
PI-2	0.02108	0.01657
UP12-1	0.02937	0.02485
UP12-2	0.03765	0.03313
UO30-1	0.02108	0.01657
UO30-2	0.03765	0.03313
ZPCH-12	0.01995	0.01657
ZPCH-30	0.01995	0.01657
PL-B	0.04217	0.03313
PL-I	0.04217	0.03313
MPL-2	0.03991	0.03313
PL-F	0.03102	0.02650
PL-CAR	0.03878	0.03313
PL-HELI	0.03878	0.03313
PL-CLA	0.02876	0.02650
PL-SSEI	0.03720	0.03313
RA-1	0.03652	0.03313
RA-2	0.03652	0.03313
RB	0.04217	0.03313
MG-B	0.03991	0.03313
RC	0.03991	0.03313
MG-C	0.03991	0.03313
R-CAR	0.01882	0.01657
CSSEI	0.01777	0.01325



La Tabla 14 presenta los costos monetarios asociados a las emisiones de CO₂ para tratamientos en pavimentos rígidos. Se incluyen los valores correspondientes al bacheo de espesor total y parcial, así como al reemplazo completo de losa, considerando dos secciones: PL-E y PL-J, las cuales tienen igual dimensión estructural. El costo ambiental del reemplazo de losa alcanza un valor significativamente más alto en comparación con los bacheos, debido a que se considera el volumen de la losa completa. A su vez, el bacheo parcial presenta la menor carga ambiental entre las alternativas analizadas para este tipo de pavimento.

Tabla 14 Costos por emisiones de CO₂ para pavimentos rígidos.

Sección	Bacheo espesor total [UF/m ²]	Bacheo espesor parcial [UF/m ²]	Reemplazo de losa [UF/losa]
PL-E	0.14249	0.07125	2.75342
PL-J	0.14249	0.07125	2.75342

La Tabla 15 muestra los costos monetarios asociados a las emisiones de CO₂ para la actividad de tratamiento superficial bituminoso múltiple (TSM). Se distinguen los valores correspondientes al uso de cemento asfáltico y emulsión asfáltica en cada una de las tres capas que componen el tratamiento.

Tabla 15 Costos por emisiones de CO₂ para la actividad TSM.

	Con cemento asfáltico [UF/m ²]	Con emulsión asfáltica [UF/m ²]
Capa 1 - Gruesa	0.0039	0.0038
Capa 2 - Intermedia	0.0020	0.0023
Capa 3 - Fina	-	0.0015

La **¡Error! La autoreferencia al marcador no es válida.** y Tabla 17 presentan los costos asociados a las emisiones de CO₂ para tratamientos de mantenimiento superficial en pavimentos asfálticos. En el caso del sello de grietas (**¡Error! La autoreferencia al marcador no es válida.**), se incluyen tres tamaños de grieta (fina, pequeña y mediana) y dos tipos de ligante: cemento asfáltico y emulsión. Por su parte, la Tabla 17 muestra los valores obtenidos para el riego de sello y la lechada asfáltica. Ambos tratamientos presentan bajos costos ambientales en comparación con otras intervenciones, lo que se explica por el bajo volumen de materiales requerido.

Tabla 16 Costos por emisiones de CO₂ para sello de grietas en pavimentos asfálticos.

Tipo de grieta	Con cemento asfáltico [UF/m]	Con emulsión asfáltica [UF/m]
Finas	0.000098	0.000113
Pequeñas	0.000423	0.000489
Medianas	0.001463	0.001692

Tabla 17 Costos por emisiones de CO₂ para tratamientos en pavimentos asfálticos.

Tratamiento	[UF/m ²]
Riego de sello	0.00120
Lechada asfáltica	0.00163



La Tabla 18 presenta los costos de referencia para actividades de mantenimiento, expresados en UF de julio de 2019.

Al comparar estos costos económicos de realizar los tratamientos con los costos ambientales estimados por emisiones de CO₂, se observa que el componente ambiental es relativamente bajo. Por tanto, en una primera instancia, el peso del criterio ambiental dentro del proceso de optimización será reducido en comparación con los criterios económicos. No obstante, esto irá cambiando a medida que el PSC incremente en los próximos años, tal como está proyectado. De este modo, su relevancia dentro del sistema irá aumentando en relación con las metas de reducción de emisiones del país.

Tabla 18 Costos unitarios por actividad (FERRER y Asociados Ingenieros Consultores, 2019).

Tipo de trabajo	Código	Unidad	Costo [UF] (Julio 2019)
Bacheo nivelante	PA-AL	m ²	0.31
Bacheo asfáltico superficial	PA-AS	m ²	0.25
Bacheo en hormigón – espesor total	PA-PF	m ²	7.43
Bacheo en hormigón – espesor parcial	PA-PP	m ²	6.38
Bacheo asfáltico profundo	PA-AD	m ²	2.47
Reemplazo de losa	SL-PC	m ²	6.86
Sello de grietas (hormigón)	CS-PC	m	0.23
Sello de grietas (asfalto)	CS-AC	m	0.18
Cepillado (localizado)	GR-PP	m ²	0.30
Sello de juntas	JS-LC	m	0.29

Cabe destacar que la optimización de los mantenimientos se proyecta para años futuros, por lo que es necesario considerar los valores proyectados del Precio Social del Carbono presentados en la Figura 6. Si bien estos valores corresponden a estimaciones y no representan con certeza los precios que efectivamente se aplicarán, constituyen la referencia oficial vigente para la planificación.

El uso de estos valores proyectados influye directamente en la ponderación del criterio ambiental dentro del proceso de optimización, ya que un aumento progresivo en estos costos genera, de forma indirecta, un mayor peso relativo de este factor frente a los criterios económicos y técnicos. Este comportamiento también refleja el creciente reconocimiento otorgado al impacto ambiental en la toma de decisiones a nivel nacional.

Es importante resaltar que el Precio Social del Carbono es estimado en función de los compromisos ambientales del país, definidos en las Contribuciones Nacionalmente Determinadas (NDC). Por tanto, su actualización periódica permite que el sistema de gestión se mantenga alineado con los objetivos de sostenibilidad y descarbonización establecidos por Chile, lo que garantiza la vigencia y relevancia del criterio ambiental dentro del SGPA.



6.3.1 Análisis del aumento relativo del Precio Social del Carbono (PSC)

Este análisis tiene como objetivo demostrar que el componente ambiental, representado por el Precio Social del Carbono (PSC), adquiere progresivamente un mayor peso dentro del costo total de los tratamientos de mantenimiento, reforzando así su relevancia como criterio técnico dentro del SGPA. Para ello, se utilizaron las proyecciones oficiales del PSC expresadas en dólares estadounidenses (USD), presentadas por Cid et al. (2024), las cuales fueron convertidas a Unidades de Fomento (UF) con el fin de compararlas con los costos de mantenimiento, que se encuentran expresados en dicha unidad.

6.3.1.1 Conversión de USD a UF

La conversión se realizó mediante una metodología práctica, basada en la razón histórica entre el valor del dólar y la UF observados al 31 de diciembre del año anterior. Esta aproximación sigue el criterio que emplean entidades como la División de Evaluación Social de Inversiones (2024), que utiliza el tipo de cambio del último día del año para presentar los Informes Sociales. Se consideró el periodo 2014–2023 (valores de cierre entre 2013 y 2022), de acuerdo con datos del Banco Central (2025a; 2025b).

Se calculó la razón UF/USD para cada año presentada en la Tabla 19, obteniéndose un promedio de 39.79, con una desviación estándar de 2.41. Las variaciones interanuales respecto al promedio oscilaron entre +12.83 % y -8.53 %, rango considerado aceptable para un análisis de carácter estimativo. Este método permitió generar una proyección aproximada del PSC en UF para los años 2026 a 2030.

Para evaluar el error asociado a la metodología, se compararon los valores reales del PSC (en [UF/tCO₂]) disponibles para los años 2024 y 2025 con sus respectivas estimaciones. En 2024, el valor real fue de 1.524 [UF/tCO₂], y el estimado, 1.593 [UF/tCO₂], con un error de +4.5 %. En 2025, el valor real fue de 1.836 [UF/tCO₂], y el estimado, 1.787 [UF/tCO₂], con un error de -2.7 %. Ambos resultados se encuentran dentro del rango de variabilidad aceptado, lo que valida la aplicación de este método para proyectar el PSC en años posteriores.

Tabla 19 Relación UF/USD observada entre 2014 y 2023.

Año	USD observado último día del año anterior	UF observada último día del año anterior	UF/USD	Variación respecto al promedio
2014	519.25	23309.56	44.89	12.83%
2015	612.92	24627.1	40.18	0.99%
2016	704.24	25629.09	36.39	-8.53%
2017	667.17	26348.83	39.49	-0.74%
2018	633.77	26799.87	42.29	6.28%
2019	681.99	27565.79	40.42	1.59%
2020	770.53	29309.94	38.04	-4.39%
2021	734.73	29070.33	39.57	-0.55%
2022	849.12	30991.74	36.50	-8.26%
2023	875.66	35110.98	40.10	0.78%



6.3.1.2 Proyección del PSC en UF

A partir del promedio de conversión UF/USD, se estimaron los valores del PSC en UF hasta 2030. La Tabla 20 muestra los valores proyectados, junto con los datos reales de 2024 y 2025.

Tabla 20 Proyección del PSC en [UF/tCO₂].

Año	PSC proyectado [USD/tCO ₂]	PSC [UF/tCO ₂] Datos reales	[UF/tCO ₂] Estimado con proporción
1	32.5	-	-
2	40.2	-	-
3	47.9	-	-
4	55.7	-	-
5	63.4	1.524	1.593
6	71.1	1.8363	1.787
7	78.8	-	1.981
8	86.6	-	2.175
9	94.3	-	2.369
10	102.0	-	2.564

6.3.1.3 Evolución del peso relativo del PSC en tratamientos de mantenimiento

Dado que los costos de mantenimiento fueron considerados constantes en UF (según lo reportado por Ferrer 2016 y 2019 para el aeropuerto de La Florida), cualquier aumento en el valor del PSC en UF representa un crecimiento real de su participación relativa en el costo total. Esta simplificación supone que factores como cambios en tecnologías, materiales o mano de obra no afectan los costos, lo cual es razonable dada la falta de información específica para proyectar esos efectos.

El análisis se centró en cinco tratamientos representativos. A continuación, se resume la evolución de la participación porcentual del PSC respecto al costo total para cada caso:

- **Bacheo asfáltico superficial en sección (PI-1):** El PSC representa un 13.4 % del costo en 2025 y sube a 19.3 % en 2030, como se muestra en la Figura 24.
- **Bacheo profundo asfáltico en (PI-1):** Como se muestra en la Figura 25, pasa de un 1.8 % en 2025 a un 2.6 % en 2030.

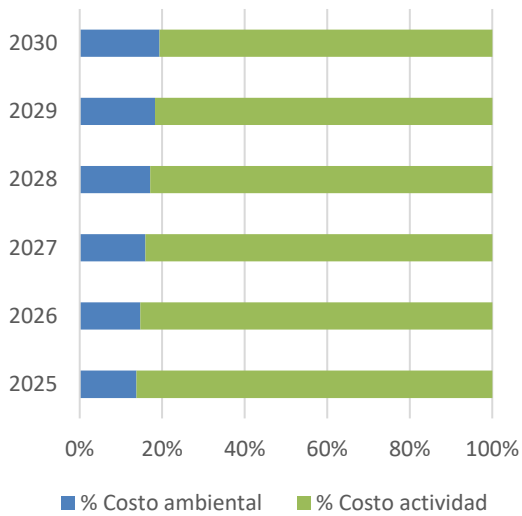


Figura 24 Relación porcentual dentro del costo total de realizar un Bacheo asfáltico superficial en la sección PI-1.

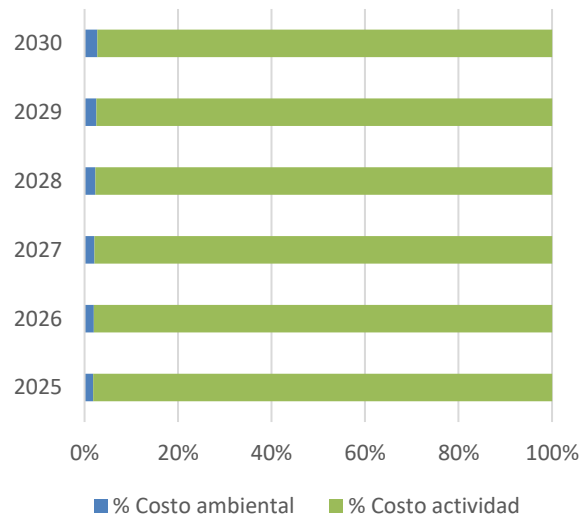


Figura 25 Relación porcentual dentro del costo total de realizar un Bacheo profundo en PI-1.

- **Bacheo de hormigón con espesor total (PL-E):** Parte con un 2.2 % en 2025, y alcanza un 3.1 % en 2030, como se presenta en la Figura 26.
- **Reemplazo de losa de hormigón (PL-E):** A pesar de ser un tratamiento de alto costo, la participación del PSC también crece de forma sostenida, como se muestra en la Figura 27.

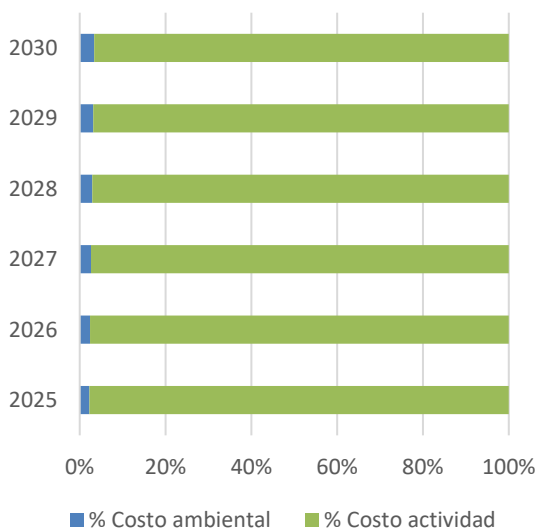


Figura 26 Relación porcentual dentro del costo total de realizar un Bacheo en hormigón de espesor total en la sección PL-E.

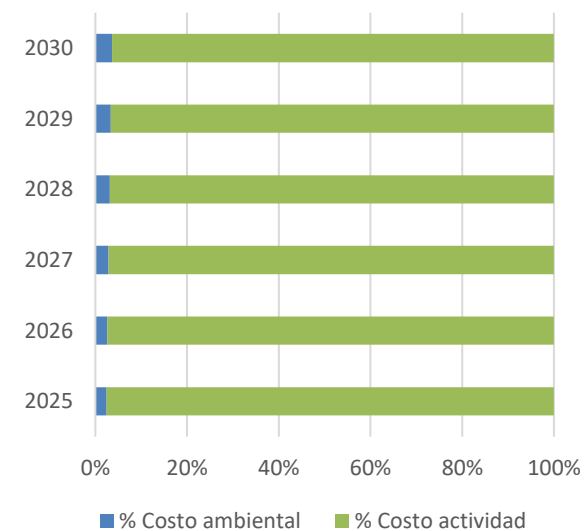


Figura 27 Relación porcentual dentro del costo total de realizar un Reemplazo de losa en PL-E.

- **Sello de grietas (asfalto):** La proporción varía según el tipo de grieta y el agente utilizado, en este caso se muestra lo obtenido para grietas medianas con cemento asfáltico, la variación se presenta en la Figura 28.

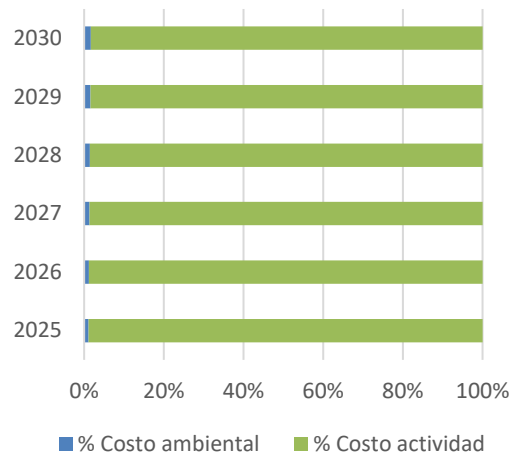


Figura 28 Relación porcentual dentro del costo total de realizar un sello de grietas en pavimento asfáltico.

Este análisis demuestra que el componente ambiental, representado por el PSC, adquiere un peso creciente y cada vez más significativo en el costo total de los tratamientos de mantenimiento. Esta evolución es coherente con la trayectoria ascendente proyectada por el Ministerio del Medio Ambiente y con los compromisos internacionales de Chile, reflejados en la Estrategia Climática de Largo Plazo y las Contribuciones Nacionalmente Determinadas (NDC).

Por lo tanto, si bien su peso relativo puede parecer menor frente a los criterios económicos en los primeros años, se espera que el PSC se convierta en un factor cada vez más relevante dentro del proceso de toma de decisiones, incluso sin modificar el resto de los parámetros técnicos o económicos.

7 Conclusiones y recomendaciones

7.1 Conclusiones

El objetivo general de esta memoria fue integrar criterios sostenibles en un Sistema de Gestión de Pavimentos Aeroportuarios (SGPA), con el propósito de aplicarlo a la red primaria de aeropuertos en Chile. Para ello, se propuso la incorporación de un criterio ambiental dentro de la etapa de optimización, permitiendo que este factor sea considerado en la selección de tratamientos de mantenimiento y rehabilitación (M&R).

Se identificó que, en la actualidad, los impactos ambientales más factibles de incorporar son aquellos que pueden ser estimados mediante herramientas disponibles, ya que no se cuenta con información de mediciones en terreno para actividades de mantenimiento. Esto llevó a acotar los parámetros ambientales al análisis de emisiones de dióxido de carbono (CO_2), en coherencia con los compromisos climáticos asumidos por el país y con la metodología propuesta para su integración.

En este contexto, se seleccionó el software PaLATE como herramienta para la estimación de emisiones, dado que cumple con criterios clave como disponibilidad, facilidad de uso, capacidad de análisis por capas y posibilidad de adaptar su base de datos. Se definió además un procedimiento de estimación por unidad de área, que permite generar valores de referencia.

Sobre la base de estas estimaciones, se estableció un criterio ambiental integrado mediante el Precio Social del Carbono, el cual constituye un parámetro oficial, monetizable y coherente con el enfoque económico del SGPA. Este criterio puede ser integrado de manera directa en la etapa de optimización como parte del costo de cada tratamiento, sin introducir complejidad adicional al modelo. Su actualización periódica permite que el sistema se mantenga alineado con los compromisos de largo plazo del país en materia de sostenibilidad. Aunque actualmente este costo ambiental es relativamente bajo,



se proyecta un aumento progresivo en los próximos años, lo que incrementará su relevancia dentro del proceso de toma de decisiones.

En conclusión, se desarrolló una propuesta metodológica concreta, aplicable y replicable, que representa un avance hacia una gestión más sostenible de los pavimentos aeroportuarios de Chile, incorporando el impacto ambiental de las actividades de mantenimiento de forma integrada con los criterios técnicos y económicos ya existentes.

7.2 Recomendaciones

Dado que el presente trabajo propone una metodología inicial para incorporar criterios ambientales en un Sistema de Gestión de Pavimentos Aeroportuarios (SGPA), se recomienda que el procedimiento desarrollado sea replicado, validado y perfeccionado mediante la colaboración activa con profesionales y expertos del área, particularmente aquellos que trabajan directamente relacionados con las actividades de mantenimiento de la red aeroportuaria.

Esta colaboración permitiría identificar con mayor precisión las condiciones reales de los tratamientos, y validar los supuestos definidos en esta investigación. En particular, es importante considerar que existe una alta variabilidad en los materiales utilizados, las técnicas de ejecución, y los espesores aplicados, tanto entre aeropuertos como entre tipos de intervención. Por ello, la participación de expertos técnicos permitiría reconocer estas diferencias y ajustar el procedimiento a las condiciones específicas de cada caso, obteniendo estimaciones más cercanas a la realidad.

Asimismo, se recomienda que la Dirección de Aeropuertos genere una base de datos con los volúmenes de materiales utilizados en actividades de mantenimiento y rehabilitación (M&R). Esta base debería construirse a partir del levantamiento sistemático de información obtenida de proyectos ya ejecutados en la red primaria, incluyendo datos como el tipo de tratamiento realizado, los materiales empleados, la cantidad utilizada por unidad de superficie, las distancias de transporte y otras variables necesarias para estimar de forma más precisa los impactos ambientales. Contar con esta información permitiría dejar atrás estimaciones basadas en supuestos generales y avanzar hacia resultados más representativos del contexto nacional, lo que aportaría a los análisis ambientales y económicos que forman parte del sistema de gestión.

Además, contar con esta información respaldada por datos reales permitiría actualizar periódicamente el sistema de gestión, incorporar nuevos materiales o tecnologías de construcción, y ajustar las estimaciones al contexto del país. Esta recomendación busca que el SGPA sea una herramienta orientada a la sostenibilidad, tomando decisiones que consideren tanto el desempeño técnico como el impacto ambiental de las intervenciones.



8 Referencias

- Alabi, B. N. T., Saeed, T. U., Amekudzi-Kennedy, A., Keller, J., & Labi, S. (2021). Evaluation criteria to support cleaner construction and repair of airport runways: A review of the state of practice and recommendations for future practice. In *Journal of Cleaner Production* (Vol. 312). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127776>
- Arteaga, Y., Brañas, J., Cabañas Fabián Olave -Empresa Nacional del Petróleo, F., Córdoba, S., Gonthier, G., & Guerrero Paulina Valenzuela, M. (2024). *HOJA DE RUTA DE SAF 2050*.
- Babashamsi, P., Md Yusoff, N. I., Ceylan, H., Md Nor, N. G., & Jenatabadi, H. S. (2016). Sustainable development factors in pavement life-cycle: Highway/airport review. In *Sustainability (Switzerland)* (Vol. 8, Issue 3). MDPI. <https://doi.org/10.3390/su8030248>
- Chang, C. M. (2020). SISTEMAS DE GESTIÓN DE PAVIMENTOS: PASADO, PRESENTE, Y FUTURO 1. *Revista Internacional de Desastres Naturales*, 19(20).
- Chen, X., & Thakkar, C. (2016). *Life-Cycle Assessment of Airport Pavement Design Alternatives for Energy and Environmental Impacts*.
- Chiola, D., Cirimele, V., & Tozzo, C. (2023). An Index for Assessing the Environmental Impact of Pavement Maintenance Operations on the Motorway Network: The Environmental Asphalt Rating. *Construction Materials*, 3(1), 62–80. <https://doi.org/10.3390/constrmater3010005>
- Cid, F., Ferrer, J., Valdés, O., Peralta, C., Contreras, R., & Co, R. H. (2024). *Estimación del precio social del carbono para la evaluación de la inversión pública en Chile*. www.issuu.com/publicacionescepal/stacks
- Consoli, F., Allen, D., Boustead, U. S. A. I., Jensen, A. A., & Parrish, R. (1993). *Guidelines for Life-Cycle Assessment: A "Code of Practice."*
- Consortium on Green Design and Manufacturing Universidad de California Berkeley. (2004). *PaLATE (Pavement Life-cycle Assessment Tool for Environmental and Economic Effects)* (2.0).
- De Solminihac Hernán, Echaveguren Tomás, & Chamorro Alondra. (2018). *Gestión de Infraestructura Vial* (Tercera Edición).
- Departamento de Planificación. (2024). *DAN 14 153 Operación de Aeródromos*.
- DGAC. (2019). *Red Aeroportuaria*. <https://www.dgac.gob.cl/aeropuertos/Red-Aeroportuaria-Nacional/>.
- Dirección de Aeropuertos. (n.d.). *ETG Sellado de Grietas en Pavimentos Asfálticos*.
- Dirección de Aeropuertos. (2013a). *ETG N°2 Riego Asfáltico de Sello o Fog Seal*.
- Dirección de Aeropuertos. (2013b). *ETG N°13 Sellado y Resellado de Junturas*.
- Dirección de Aeropuertos. (2014a). *ETG N°3 Lechada de Asfalto Emulsionado o Slurry Seal*.
- Dirección de Aeropuertos. (2014b). *ETG N°12 Capa de Base Material Chancado*.
- Dirección de Aeropuertos. (2016). *ETG N°29 PARA CONCRETO DE CEMENTO PORTLANDESTRUCUTURAL*.
- Dirección de Aeropuertos. (2017). *ETG N°5 Tratamiento superficial múltiple*.
- Dirección de Aeropuertos. (2024a). *ETG N°1 PARA PAVIMENTOS FLEXIBLES TIPO MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE*.
- Dirección de Aeropuertos. (2024b). *Red Primaria*. <https://aeropuertos.mop.gob.cl/redaeroportuaria/Paginas/default.aspx>



- División de Evaluación Social de Inversiones. (2014). *Precios Sociales Vigentes 2014 División de Evaluación Social de Inversiones*.
- División de Evaluación Social de Inversiones. (2015). *Precios Sociales Vigentes 2015 División de Evaluación Social de Inversiones*.
- División de Evaluación Social de Inversiones. (2016). *Precios Sociales Vigentes 2016*.
- División de Evaluación Social de Inversiones. (2017). *Estimación del Precio Social del CO2*.
<http://sni.ministeriodesarrollosocial.gob.cl/evaluacion-iniciativas-de-inversion/evaluacion-ex-ante/metodologias->
- División de Evaluación Social de Inversiones. (2018). *Precios Sociales*.
- División de Evaluación Social de Inversiones. (2022). *Informe Precios Sociales 2022*.
- División de Evaluación Social de Inversiones. (2023). *Informe Precios Sociales 2023*.
- División de Evaluación Social de Inversiones. (2024). *PRECIOS SOCIALES REPORTE ANUAL | 2024*.
www.sni.gob.cl
- FERRER y Asociados Ingenieros Consultores. (2016). *INFORME DIAGNÓSTICO DE PAVIMENTOS MEDIANTE MÉTODO PCI AÑO 2015 AEROPUERTO LA SERENA*.
- FERRER y Asociados Ingenieros Consultores. (2019). *INFORME DIAGNÓSTICO DE PAVIMENTOS-MÉTODO PCI AEROPUERTO LA FLORIDA*.
- FERRER y Asociados Ingenieros Consultores. (2020). *INFORME DIAGNÓSTICO DE PAVIMENTOS-MÉTODO PCI AEROPUERTO LA FLORIDA, LA SERENA*.
- FERRER y Asociados Ingenieros Consultores. (2024). *INFORME DIAGNÓSTICO DE PAVIMENTOS AEROPORTUARIOS MEDIANTE MÉTODO PCI-2024 AERÓDROMO LA FLORIDA, REGIÓN DE COQUIMBO*.
- Gobierno de Chile. (2021). *ESTRATEGIA CLIMÁTICA DE LARGO PLAZO DE CHILE CAMINO A LA CARBONO NEUTRALIDAD Y RESILIENCIA A MÁS TARDAR AL 2050*.
- Kendall, A., & Santero, N. (2010). An Introduction to Life Cycle Assessment (LCA). In University of California (Ed.), *Pavement Life Cycle Assessment Workshop*.
- Kulikowski, J. (2017). *LCA Case Study for O'Hare International Airport Taxiway A & B Rehabilitation*. U.S. Air Force, Tyndall AFB, FL.
- MDSF. (2023). *Chile Agenda 2030 ODS*. <https://www.chileagenda2030.gob.cl/>
- Mercado, R., Bracho, C., & Avendaño, J. (2008). *FIRP S365-A EMULSIONES ASFALTICAS*.
- Ministerio del Medio Ambiente. (2025). *ANTEPROYECTO ACTUALIZACIÓN DE LA CONTRIBUCIÓN DETERMINADA A NIVEL NACIONAL 2025*.
<https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6>
- Naciones Unidas. (1987). *Informe de la Comisión Mundial sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo*.
- Nathman, R., McNeil, S., & Van Dam, T. J. (2009). Integrating environmental perspectives into pavement management: Adding the pavement life-cycle assessment tool for environmental and economic effects to the decision-making toolbox. *Transportation Research Record*, 2093, 40–49.
<https://doi.org/10.3141/2093-05>
- ONU. (2025). *Objetivos de Desarrollo Sostenible*.
<https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/climate-change-2/>
- Rahman, M., & Tarefder, R. (2012). *SELECTION OF THE MOST COST EFFECTIVE PAVEMENT MAINTENANCE TREATMENT FOR SELECTED AIRPORT PAVEMENTS IN NEW MEXICO*.



- Recycled Materials Resource Center University of Wisconsin-Madison. (2025). *PaLATE*. <https://rmrc.wisc.edu/palate/>
- Santos, J. M., Thyagarajan, S., Keijzer, E., Fernandez Flores, R., & Flintsch, G. (2017). *Pavement life cycle assessment-a comparison of American and European tools*. <https://hal.science/hal-01651650>
- Sphera. (2023). *Search Life Cycle Assessment Datasets*. <https://lcadatabase.sphera.com/>
- Tisberger Ibañez, T. E. (2019). *Life Cycle Assessment of Pavements through PaLATE*.
- Tolmo, M. B. (2020). *FORMULACIÓN DE UN MARCO TEÓRICO PARA LA GESTIÓN DE PAVIMENTOS AEROPORTUARIOS, APLICABLE A LA RED NACIONAL DE AEROPUERTOS* [Memoria para Optar al Título de Ingeniero Civil]. UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA.
- Torres-Machí, C. T. (2015). *OPTIMIZACIÓN HEURÍSTICA MULTI OBJETIVO PARA LA GESTIÓN DE ACTIVOS DE INFRAESTRUCTURAS DE TRANSPORTE TERRESTRE*.
- Valencia, P., De Vivienda, M., Bárbara, U., Ministerio, R., María, E., Aguirre, F., Green, C., Council, B., Narváez, R., Desarrollador, E., Villaseñor, M., Chile, E., Borregaard, N., Bobadilla, M., & Espinoza, A. (2021). *Estrategia Nacional de Huella de Carbono en el Sector Construcción*.
- Vivian W. Y. Tam, & Khoa N. Le. (2009). *On Implementation of Waste Management Systems in the Hong Kong Construction Industry using Spectral Methods*. <https://doi.org/https://doi.org/doi:10.1109/IEEM.2009.5373274>
- Wiltshire, J., & Jaimurzina, A. (2017). *Transporte aéreo como motor del desarrollo sostenible en América Latina y el Caribe: retos y propuestas de política*.



A. Apéndice 1 Herramientas de estimación de impactos ambientales.

Tabla 21 Herramientas analizadas.

Herramienta	Costo	Adaptabilidad del modelo	País	Última actualización	Estado	Link descarga
Athena Pavement LCA	0	No	Canadá, Estados Unidos	> 5 años	-	-
DuboCalc	350 EU/añual	?	Países Bajos	2023	Vigente	https://www.dubocalc.com
Ecochain	340 EU/añual	-	Europa		Vigente	https://ecochain.com
Ecorce-M	0	No	Francia	2013	Vigente	https://www.ifsttar.fr/ressources/eco-comparateur-ecorce2
Emerald EPD tool	400 EU/añual	Sí	Estados Unidos	2022	-	-
FAA PAVEAIR	0	-	Estados Unidos	2015	No ambiental	https://www.airporttech.tc.faa.gov/Products/Airport-Safety-Papers-Publications/Airport-Safety-Detail/faa-paveair-373
GaBi	380 EU/añual	Sí	Mundial	2023	Vigente	https://sphera.com/life-cycle-assessment-software-gabi/
GreenDOT	0	-	Estados Unidos	> 5 años	Vigente	https://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/nchrp/docs/NC_HRP25-25(58)_GreenDOT_v1-5b.xls
Klimatkalkyl	0	Sí	Suecia	-	Vigente	https://www.trafikverket.se
LCA-AIR 1.0	-	-	-	-	No encontrada	https://www.solidforest.com/es/aire/airelca.html
LCA-PAVE tool	0	-	Estados Unidos	-	Investigación	https://www.fhwa.dot.gov/pavement/sustainability/tools/
LCC AM-QM	Licencia EU/añual	?	Mundial	> 5 años	-	https://www.sg-assetmanagement.nl/site/lcc-amqm/#Contact
LCCA original and eSpress	0	?	Estados Unidos	> 5 años	-	https://www.asphaltroads.org
LCE4ROADS	0	Sí	Unión Europea	> 5 años	No encontrado	-
LICCER	0	-	Europa	2013	No encontrado	-
Oneclick LCA	170 EU/mes	-	-		Solo para construcciones	https://www.oneclicklca.com
OpenLCA	0	-	Mundial	2023	Investigación	https://www.openlca.org/download/
PaLATE V2.2	0	-	Estados Unidos	2011	Investigación	https://rmrc.wisc.edu/palate/
Real Cost LCCA - FHWA	0	Sí	Estados Unidos	> 5 años	-	https://www.fhwa.dot.gov/pavement/sustainability/tools/
SEVE	Licencia EU/añual	Sí	Mundial	> 10 años	No vigente	-



Tabla 19 Herramientas analizadas (continuación).

Herramienta	Costo	Adaptabilidad del modelo	País	Última actualización	Estado	Link descarga
SMART SPP	0	No	Unión Europea	2011	No vigente	http://www.smart-spp.eu/guidance http://www.lcc-tool.eu
SimaPro	2630 EU/año	Sí	Mundial	> 5 años	Vigente	https://simapro.com/plans/?_types=education https://simapro.com/try/
VTTI/UC	0	-	Estados Unidos	2015	No vigente	-
asPECT	0	-	Europa	2014	Vigente	https://mailchi.mp/ceca/aspect

B. Apéndice 2 Propuesta metodológica para incorporar el criterio ambiental

Este procedimiento permite estimar el impacto ambiental de actividades de mantenimiento o rehabilitación de pavimentos, aplicando el Precio Social del Carbono (PSC) como criterio de decisión en la etapa de optimización del sistema de gestión.

El proceso propuesto tiene como objetivo generar una estimación unitaria, es decir, asociada a una unidad estándar de análisis (por ejemplo, 1 [m²] de tratamiento), tal como cuantifica la DAP las actividades de mantenimiento.

A. Estimación de volúmenes de materiales

1. Identificar el tipo de tratamiento a analizar.
2. Identificar los materiales involucrados en el mantenimiento.

Para esto, se deben revisar las Especificaciones Técnicas Generales (ETG) de la DAP y verificar qué materiales corresponden al tratamiento seleccionado.

En la Figura 10 se muestra la lista de materiales que pueden utilizarse en el software PaLATE. En caso de que algún material requerido no se encuentre en dicha lista, se debe buscar uno equivalente dentro de los disponibles o justificar que no será considerado en la estimación.

3. Definir la estructura del pavimento y sus dimensiones.

Se debe establecer la estructura del pavimento donde se aplicará el tratamiento, considerando el número de capas y su respectiva composición. Para efectos de estandarización, se debe suponer que el mantenimiento se realiza sobre una unidad de análisis de 1 [m²].

En algunos tratamientos, la estructura no tiene un impacto directo en la estimación del volumen, pero es importante definirla igualmente para asegurar la coherencia con las entradas del software.

4. Conversión de unidades de masa a volumen.

En caso de que las ETG entreguen las cantidades de materiales en unidades de masa, estas deben ser convertidas a volumen, ya que es el formato requerido por el software PaLATE. Para esta conversión, se deben utilizar las densidades de los materiales, si no se cuenta con esta información, se pueden emplear las densidades referenciales que sugiere PaLATE para cada tipo de material.



5. Calcular el volumen para cada material requerido.

Una vez identificados los materiales, se debe calcular el volumen correspondiente a cada uno de ellos. Para esto, se utilizan las dimensiones definidas en el paso anterior y considerar las profundidades según la capa que interviene el tratamiento.

En algunos casos, especialmente cuando el mantenimiento puede realizarse con distintos espesores, el volumen quedará expresado en función de la profundidad. En estos casos, se debe dejar claramente indicado que el volumen está relacionado al espesor definido para cada actividad.

B. Estimación de parámetros ambientales

1. Descargar herramienta PaLATE.

Para realizar la estimación de emisiones ambientales, se debe utilizar el software, la herramienta está disponible en formato Excel y puede descargarse gratuitamente desde el sitio oficial del Recycled Materials Resource Center en el siguiente enlace: <https://rmrc.wisc.edu/palate/>

2. Ingreso de datos estructurales en PaLATE

Abrir la herramienta PaLATE y dirigirse a la hoja “Des”. En esta sección se deben ingresar las dimensiones correspondientes a la estructura del pavimento, expresadas en las unidades que exige el software, como se muestra en la Figura 29.

Layer Specifications				
Layer	Width [ft]	Length [miles]	Depth [inches]	Volume [yd^3]
Wearing Course 1				0
Wearing Course 2				0
Wearing Course 3				0
Subbase 1				0
Subbase 2				0
Subbase 3				0
Subbase 4				0
Total			0	0

Figura 29 Tabla de dimensiones de la estructura del pavimento (Consortium on Green Design and Manufacturing Universidad de California Berkeley, 2004).

3. Ingreso de datos de materiales, procesos y desechos

En la hoja “Maint” del archivo PaLATE se debe ingresar la información correspondiente a los materiales utilizados, procesos asociados y residuos transportados a vertederos. Esta información debe completarse para cada una de las capas del pavimento que sean afectadas por el tratamiento. En la sección de materiales, se deben ingresar los volúmenes estimados en unidades de yardas cúbicas [yd³]. Estos volúmenes se ingresan en la columna E si se está analizando un pavimento asfáltico, o en la columna F si se trata de un pavimento rígido. Para cada material se debe indicar el volumen, la distancia de transporte en millas y el medio de transporte utilizado, en caso de no contar con esta última información, se puede utilizar el valor por defecto que entrega el software. En la sección de procesos se debe ingresar el volumen correspondiente al tratamiento o actividad que se está analizando. Finalmente, si se cuenta con información sobre los residuos generados por la actividad, esta se debe ingresar en la sección “Waste to Landfill”, indicando también la distancia de transporte. Este procedimiento debe repetirse para cada capa intervenida en la actividad de mantenimiento o rehabilitación.



4. Revisión de resultados en PaLATE

Una vez completado el ingreso de datos, los resultados de la estimación se encuentran en la hoja “Env Result”. En esta sección se muestra una tabla con el resumen de las emisiones totales generadas por el tratamiento analizado, además de gráficos y estimaciones detalladas para cada categoría de impacto ambiental. Para la aplicación del criterio ambiental propuesto, se deben utilizar específicamente los datos correspondientes a las emisiones de CO₂, expresadas en kilogramos.

C. Cálculo monetario de emisiones de CO₂

1. Cálculo monetario de emisiones de CO₂

Con las emisiones de CO₂ estimadas, se debe aplicar el Precio Social del Carbono (PSC) correspondiente al año de análisis. Este valor debe obtenerse desde los reportes oficiales de la División de Evaluación Social de Inversiones del Ministerio de Desarrollo Social de Chile. En el caso de proyectar análisis a años futuros, se debe considerar la estimación del Precio Social del Carbono para esos periodos, tal como se presenta en los informes oficiales disponibles.

Para asegurar la compatibilidad con la metodología de optimización del SGPA, es necesario expresar estos costos en Unidades de Fomento (UF). De este modo, se podrá incorporar el resultado como un criterio más dentro del proceso de toma de decisiones.

D. Apéndice 3 Datos Caso Aeropuerto La Florida

Tabla 22 Densidades Referenciales (Consortium on Green Design and Manufacturing Universidad de California Berkeley, 2004).

Materiales	Densidad [ton/yd³]
Agregado virgen	2.23
Bitumen	0.84
Cemento	1.27
Aditivos para hormigón	0.84
Emulsión asfáltica	0.84
RAP	1.85
FRAP	1.85
RAS	1.12
RCA	1.88
Cenizas volantes de carbón	2.20
Cenizas de fondo de carbón	2.00
Escoria de alto horno	1.72
Arena de fundición	1.50
Neumáticos reciclados / caucho triturado	1.92
Vidrio reciclado	1.93
Agua	0.84
Barras de refuerzo de acero	0.24



Tabla 23 Datos estructurales aeródromo de La Florida para ingreso en PaLATE (FERRER y Asociados Ingenieros Consultores, 2024).

Sección	Tipo	Ancho [ft]	Largo [ft]	Profundidad [in]						
				Capa superficial 1	Capa superficial 2	Capa superficial 3	Subbase 1	Subbase 2	Subbase 3	Subbase 4
PI-1	A	49.21	98.43	3.94	0.00	0.00	7.87	7.68	0.00	0.00
PI-2	A	49.21	98.43	1.97	0.00	0.00	7.87	7.68	0.00	0.00
UP12-1	A	49.21	98.43	2.95	0.00	0.00	7.87	7.68	0.00	0.00
UP12-2	A	49.21	98.43	3.94	0.00	0.00	7.87	7.68	0.00	0.00
UO30-1	A	49.21	70.54	1.97	0.00	0.00	7.87	7.87	0.00	0.00
UO30-2	A	49.21	70.54	3.94	0.00	0.00	7.87	7.87	0.00	0.00
ZPCH-12	A	49.21	98.43	1.97	0.00	0.00	5.91	0.00	0.00	0.00
ZPCH-30	A	49.21	98.43	1.97	0.00	0.00	5.91	0.00	0.00	0.00
PL-B	A	57.41	152.56	3.94	0.00	0.00	15.75	0.00	0.00	0.00
PL-E	H	57.41	86.94	17.72	0.00	0.00	5.91	0.00	0.00	0.00
PL-I	A	57.41	152.56	3.94	0.00	0.00	15.75	8.66	0.00	0.00
PL-J	H	57.41	86.94	17.72	0.00	0.00	5.91	0.00	0.00	0.00
MPL-1	A	26.25	183.73	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
MPL-2	A	26.25	131.23	3.94	0.00	0.00	11.81	0.00	0.00	0.00
PL-F	A	65.62	67.26	3.15	0.00	0.00	7.87	0.00	0.00	0.00
PL-CAR	A	49.21	78.74	3.94	0.00	0.00	9.84	0.00	0.00	0.00
PL-HELI	A	49.21	78.74	3.94	0.00	0.00	9.84	0.00	0.00	0.00
PL-CLA	A	49.21	98.43	3.15	0.00	0.00	3.94	0.00	0.00	0.00
PL-SSEI	A	85.30	85.30	3.94	0.00	0.00	7.09	0.00	0.00	0.00
RA-1	A	22.97	170.60	3.94	0.00	0.00	5.91	0.00	0.00	0.00
RA-2	A	22.97	170.60	3.94	0.00	0.00	5.91	0.00	0.00	0.00
RB	A	55.77	82.02	3.94	0.00	0.00	15.75	0.00	0.00	0.00
MG-B	A	26.25	131.23	3.94	0.00	0.00	11.81	0.00	0.00	0.00
RC	A	55.77	82.02	3.94	0.00	0.00	11.81	0.00	0.00	0.00
MG-C	A	26.25	131.23	3.94	0.00	0.00	11.81	0.00	0.00	0.00
RD	A	34.45	141.08	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
R-CAR	A	26.25	200.95	1.97	0.00	0.00	3.94	0.00	0.00	0.00
CSSEI	A			1.57	0.00	0.00	7.87	0.00	0.00	0.00



E. Apéndice 4 Estimación de parámetros ambientales

Tabla 24 Estimación de parámetros ambientales tratamientos que dependen de la estructura del pavimento, considerando el Aeropuerto de La Florida.

Tipo de pavimento	Actividad	Sección	Energía [MJ]	Consumo de agua [g]	CO ₂ [kg]	NOx [kg]	PM-10 [kg]	SO ₂ [kg]	CO [kg]	Hg [g]	Pb [g]	Residuos Peligrosos Generados según RCRA [kg]	Potencial de toxicidad humana (cáncer)	Potencial de toxicidad humana (no cancerígeno)
Asfalto	Bacheo profundo	PI-1	447.03	0.68378	0.02486	0.17695	0.09220	2.81397	0.08838	0.00059	0.02879	5.929	96.55937	80874.2211
Asfalto	Bacheo profundo	PI-2	243.97	0.61229	0.01389	0.09864	0.06214	1.40871	0.04663	0.00029	0.01482	2.998	49.88476	57807.8196
Asfalto	Bacheo profundo	UP12-1	345.50	0.64803	0.01937	0.13779	0.07717	2.11134	0.06750	0.00044	0.02181	4.463	73.22207	69341.0203
Asfalto	Bacheo profundo	UP12-2	447.03	0.68378	0.02486	0.17695	0.09220	2.81397	0.08838	0.00059	0.02879	5.929	96.55937	80874.2211
Asfalto	Bacheo profundo	UO30-1	243.97	0.61229	0.01389	0.09864	0.06214	1.40871	0.04663	0.00029	0.01482	2.998	49.88476	57807.8196
Asfalto	Bacheo profundo	UO30-2	447.03	0.68378	0.02486	0.17695	0.09220	2.81397	0.08838	0.00059	0.02879	5.929	96.55937	80874.2211
Asfalto	Bacheo profundo	ZPCH-12	233.74	0.47709	0.01316	0.09356	0.05412	1.40785	0.04541	0.00029	0.01461	2.981	49.08222	49122.4651
Asfalto	Bacheo profundo	ZPCH-30	233.74	0.47709	0.01316	0.09356	0.05412	1.40785	0.04541	0.00029	0.01461	2.981	49.08222	49122.4651



Tabla 22 Estimación de parámetros ambientales tratamientos que dependen de la estructura del pavimento, considerando el Aeropuerto de La Florida (continuación).

Tipo de pavimento	Actividad	Sección	Energía [MJ]	Consumo de agua [g]	CO ₂ [kg]	NOx [kg]	PM-10 [kg]	SO ₂ [kg]	CO [kg]	Hg [g]	Pb [g]	Residuos Peligrosos Generados según RCRA [kg]	Potencial de toxicidad humana (cáncer)	Potencial de toxicidad humana (no cancerígeno)
Asfalto	Bacheo profundo	PL-B	487.93	1.22457	0.02778	0.19728	0.12428	2.81742	0.09326	0.00059	0.02965	5.996	99.76952	115615.6391
Asfalto	Bacheo profundo	PL-I	487.93	1.22457	0.02778	0.19728	0.12428	2.81742	0.09326	0.00059	0.02965	5.996	99.76952	115615.6391
Asfalto	Bacheo profundo	MPL-2	467.48	0.95418	0.02632	0.18711	0.10824	2.81569	0.09082	0.00059	0.02922	5.962	98.16445	98244.9301
Asfalto	Bacheo profundo	PL-F	365.81	0.65518	0.02047	0.14563	0.08018	2.25186	0.07168	0.00047	0.02320	4.757	77.88953	71647.6605
Asfalto	Bacheo profundo	PL-CAR	457.26	0.81898	0.02559	0.18203	0.10022	2.81483	0.08960	0.00059	0.02900	5.946	97.36191	89559.5756
Asfalto	Bacheo profundo	PL-HELI	457.26	0.81898	0.02559	0.18203	0.10022	2.81483	0.08960	0.00059	0.02900	5.946	97.36191	89559.5756
Asfalto	Bacheo profundo	PL-CLA	345.36	0.38478	0.01902	0.13546	0.06414	2.25014	0.06924	0.00047	0.02277	4.723	76.28445	54276.9515
Asfalto	Bacheo profundo	PL-SSEI	442.94	0.62970	0.02457	0.17492	0.08900	2.81362	0.08789	0.00059	0.02870	5.922	96.23836	77400.0793
Asfalto	Bacheo profundo	RA-1	436.81	0.54858	0.02413	0.17187	0.08418	2.81310	0.08715	0.00059	0.02857	5.912	95.75684	72188.8666
Asfalto	Bacheo profundo	RA-2	436.81	0.54858	0.02413	0.17187	0.08418	2.81310	0.08715	0.00059	0.02857	5.912	95.75684	72188.8666



Tabla 22 Estimación de parámetros ambientales tratamientos que dependen de la estructura del pavimento, considerando el Aeropuerto de La Florida (continuación).

Tipo de pavimento	Actividad	Sección	Energía [MJ]	Consumo de agua [g]	CO ₂ [kg]	NOx [kg]	PM-10 [kg]	SO ₂ [kg]	CO [kg]	Hg [g]	Pb [g]	Residuos Peligrosos Generados según RCRA [kg]	Potencial de toxicidad humana (cáncer)	Potencial de toxicidad humana (no cancerígeno)
Asfalto	Bacheo profundo	RB	487.93	1.22457	0.02778	0.19728	0.12428	2.81742	0.09326	0.00059	0.02965	5.996	99.76952	115615.6391
Asfalto	Bacheo profundo	MG-B	467.48	0.95418	0.02632	0.18711	0.10824	2.81569	0.09082	0.00059	0.02922	5.962	98.16445	98244.9301
Asfalto	Bacheo profundo	RC	467.48	0.95418	0.02632	0.18711	0.10824	2.81569	0.09082	0.00059	0.02922	5.962	98.16445	98244.9301
Asfalto	Bacheo profundo	MG-C	467.48	0.95418	0.02632	0.18711	0.10824	2.81569	0.09082	0.00059	0.02922	5.962	98.16445	98244.9301
Asfalto	Bacheo profundo	R-CAR	223.52	0.34189	0.01243	0.08847	0.04610	1.40698	0.04419	0.00029	0.01439	2.965	48.27969	40437.1105
Asfalto	Bacheo profundo	CSSEI	203.35	0.59799	0.01169	0.08298	0.05613	1.12766	0.03828	0.00024	0.01203	2.412	40.54984	53194.5393
Asfalto	Bacheo superficial	PI-1	403.35	0.14251	0.02174	0.14471	0.05771	2.80980	0.08260	0.00058	0.02782	5.840	93.28112	46049.2470
Asfalto	Bacheo superficial	PI-2	201.67	0.07126	0.01087	0.07236	0.02886	1.40490	0.04130	0.00029	0.01391	2.920	46.64056	23024.6235
Asfalto	Bacheo superficial	UP12-1	302.51	0.10688	0.01630	0.10853	0.04328	2.10735	0.06195	0.00044	0.02087	4.380	69.96084	34536.9353
Asfalto	Bacheo superficial	UP12-2	403.35	0.14251	0.02174	0.14471	0.05771	2.80980	0.08260	0.00058	0.02782	5.840	93.28112	46049.2470



Tabla 22 Estimación de parámetros ambientales tratamientos que dependen de la estructura del pavimento, considerando el Aeropuerto de La Florida (continuación).

Tipo de pavimento	Actividad	Sección	Energía [MJ]	Consumo de agua [g]	CO ₂ [kg]	NOx [kg]	PM-10 [kg]	SO ₂ [kg]	CO [kg]	Hg [g]	Pb [g]	Residuos Peligrosos Generados según RCRA [kg]	Potencial de toxicidad humana (cáncer)	Potencial de toxicidad humana (no cancerígeno)
Asfalto	Bacheo superficial	UO30-1	201.67	0.07126	0.01087	0.07236	0.02886	1.40490	0.04130	0.00029	0.01391	2.920	46.64056	23024.6235
Asfalto	Bacheo superficial	UO30-2	403.35	0.14251	0.02174	0.14471	0.05771	2.80980	0.08260	0.00058	0.02782	5.840	93.28112	46049.2470
Asfalto	Bacheo superficial	ZPCH-12	201.67	0.07126	0.01087	0.07236	0.02886	1.40490	0.04130	0.00029	0.01391	2.920	46.64056	23024.6235
Asfalto	Bacheo superficial	ZPCH-30	201.67	0.07126	0.01087	0.07236	0.02886	1.40490	0.04130	0.00029	0.01391	2.920	46.64056	23024.6235
Asfalto	Bacheo superficial	PL-B	403.35	0.14251	0.02174	0.14471	0.05771	2.80980	0.08260	0.00058	0.02782	5.840	93.28112	46049.2470
Asfalto	Bacheo superficial	PL-I	403.35	0.14251	0.02174	0.14471	0.05771	2.80980	0.08260	0.00058	0.02782	5.840	93.28112	46049.2470
Asfalto	Bacheo superficial	MPL-2	403.35	0.14251	0.02174	0.14471	0.05771	2.80980	0.08260	0.00058	0.02782	5.840	93.28112	46049.2470
Asfalto	Bacheo superficial	PL-F	322.68	0.11401	0.01739	0.11577	0.04617	2.24784	0.06608	0.00046	0.02226	4.672	74.62490	36839.3976
Asfalto	Bacheo superficial	PL-CAR	403.35	0.14251	0.02174	0.14471	0.05771	2.80980	0.08260	0.00058	0.02782	5.840	93.28112	46049.2470
Asfalto	Bacheo superficial	PL-HELI	403.35	0.14251	0.02174	0.14471	0.05771	2.80980	0.08260	0.00058	0.02782	5.840	93.28112	46049.2470



Tabla 22 Estimación de parámetros ambientales tratamientos que dependen de la estructura del pavimento, considerando el Aeropuerto de La Florida (continuación).

Tipo de pavimento	Actividad	Sección	Energía [MJ]	Consumo de agua [g]	CO ₂ [kg]	NOx [kg]	PM-10 [kg]	SO ₂ [kg]	CO [kg]	Hg [g]	Pb [g]	Residuos Peligrosos Generados según RCRA [kg]	Potencial de toxicidad humana (cáncer)	Potencial de toxicidad humana (no cancerígeno)
Asfalto	Bacheo superficial	PL-CLA	322.68	0.11401	0.01739	0.11577	0.04617	2.24784	0.06608	0.00046	0.02226	4.672	74.62490	36839.3976
Asfalto	Bacheo superficial	PL-SSEI	403.35	0.14251	0.02174	0.14471	0.05771	2.80980	0.08260	0.00058	0.02782	5.840	93.28112	46049.2470
Asfalto	Bacheo superficial	RA-1	403.35	0.14251	0.02174	0.14471	0.05771	2.80980	0.08260	0.00058	0.02782	5.840	93.28112	46049.2470
Asfalto	Bacheo superficial	RA-2	403.35	0.14251	0.02174	0.14471	0.05771	2.80980	0.08260	0.00058	0.02782	5.840	93.28112	46049.2470
Asfalto	Bacheo superficial	RB	403.35	0.14251	0.02174	0.14471	0.05771	2.80980	0.08260	0.00058	0.02782	5.840	93.28112	46049.2470
Asfalto	Bacheo superficial	MG-B	403.35	0.14251	0.02174	0.14471	0.05771	2.80980	0.08260	0.00058	0.02782	5.840	93.28112	46049.2470
Asfalto	Bacheo superficial	RC	403.35	0.14251	0.02174	0.14471	0.05771	2.80980	0.08260	0.00058	0.02782	5.840	93.28112	46049.2470
Asfalto	Bacheo superficial	MG-C	403.35	0.14251	0.02174	0.14471	0.05771	2.80980	0.08260	0.00058	0.02782	5.840	93.28112	46049.2470
Asfalto	Bacheo superficial	R-CAR	201.67	0.07126	0.01087	0.07236	0.02886	1.40490	0.04130	0.00029	0.01391	2.920	46.64056	23024.6235
Asfalto	Bacheo superficial	CSSEI	161.34	0.05700	0.00870	0.05788	0.02308	1.12392	0.03304	0.00023	0.01113	2.336	37.31245	18419.6988



Tabla 22 Estimación de parámetros ambientales tratamientos que dependen de la estructura del pavimento, considerando el Aeropuerto de La Florida (continuación).

Tipo de pavimento	Actividad	Sección	Energía [MJ]	Consumo de agua [g]	CO ₂ [kg]	NOx [kg]	PM-10 [kg]	SO ₂ [kg]	CO [kg]	Hg [g]	Pb [g]	Residuos Peligrosos Generados según RCRA [kg]	Potencial de toxicidad humana (cáncer)	Potencial de toxicidad humana (no cancerígeno)
Hormigón	Bacheo espesor total	PL-E	731.33	0.57139	0.09350	1.17543	0.43131	1.05293	0.58144	0.00177	0.11785	1.531	14.81309	161947.6248
Hormigón	Bacheo espesor total	PL-J	731.33	0.57139	0.09350	1.17543	0.43131	1.05293	0.58144	0.00177	0.11785	1.531	14.81309	161947.6248
Hormigón	Bacheo espesor parcial	PL-E	365.67	0.28570	0.04675	0.58771	0.21565	0.52646	0.29072	0.00089	0.05893	0.765	7.40654	80973.8124
Hormigón	Bacheo espesor parcial	PL-J	365.67	0.28570	0.04675	0.58771	0.21565	0.52646	0.29072	0.00089	0.05893	0.765	7.40654	80973.8124
Hormigón	Reemplazo de losa	PL-E	14131.52	11.04095	1.80671	22.71266	8.33412	20.34567	11.23520	0.03429	2.27721	29.578	286.23212	3129300.6589
Hormigón	Reemplazo de losa	PL-J	14131.52	11.04095	1.80671	22.71266	8.33412	20.34567	11.23520	0.03429	2.27721	29.578	286.23212	3129300.6589



Tabla 25 Estimación de parámetros ambientales tratamientos superficiales usando PaLATE.

Tipo de pavimento	Actividad			Energía [MJ]	Consumo de agua [g]	CO ₂ [kg]	NOx [kg]	PM-10 [kg]	SO ₂ [kg]	CO [kg]	Hg [g]	Pb [g]	Residuos Peligrosos Generados según RCRA [kg]	Potencial de toxicidad humana (cáncer)	Potencial de toxicidad humana (no cancerígeno)
Asfalto	Sello de grietas	Grietas finas	Con emulsión asfáltica	1.15	0.00047	0.00006	0.00038	0.00006	0.00194	0.00027	0.00000	0.00009	0.020	0.00001	0.0075
Asfalto	Sello de grietas	Grietas finas	Con cemento asfáltico	1.33	0.00055	0.00007	0.00043	0.00007	0.00199	0.00031	0.00000	0.00011	0.023	0.35827	0.1558
Asfalto	Sello de grietas	Grietas pequeñas	Con emulsión asfáltica	4.97	0.00205	0.00028	0.00162	0.00026	0.00842	0.00117	0.00001	0.00040	0.087	0.00002	0.0257
Asfalto	Sello de grietas	Grietas pequeñas	Con cemento asfáltico	5.74	0.00237	0.00032	0.00187	0.00030	0.00864	0.00135	0.00001	0.00047	0.100	1.55249	0.6684
Asfalto	Sello de grietas	Grietas medianas	Con emulsión asfáltica	17.22	0.00709	0.00096	0.00562	0.00091	0.02915	0.00405	0.00003	0.00140	0.300	0.00007	0.0889
Asfalto	Sello de grietas	Grietas medianas	Con cemento asfáltico	19.88	0.00820	0.00111	0.00646	0.00105	0.02991	0.00469	0.00003	0.00162	0.347	5.37399	2.3136
Asfalto	Lechada asfáltica	-	-	19.46	0.00754	0.00107	0.00682	0.00177	0.07488	0.00434	0.00003	0.00148	0.315	0.07170	884.4010
Asfalto	Riego de sello	-	-	14.16	0.00583	0.00079	0.00462	0.00075	0.02397	0.00333	0.00002	0.00115	0.247	0.00006	0.0731
Asfalto	Tratamiento bituminoso múltiple	-	Con cemento asfáltico	47.24	0.01708	0.00257	0.01777	0.00629	0.28663	0.00994	0.00007	0.00334	0.704	11.16062	4521.8841
Asfalto	Tratamiento bituminoso múltiple	-	Con emulsión asfáltica	46.31	0.01666	0.00251	0.01752	0.00623	0.29257	0.00969	0.00007	0.00326	0.686	0.36605	4517.4380



Tabla 23 Estimación de parámetros ambientales tratamientos superficiales usando PaLATE (continuación).

Tipo de pavimento	Actividad		Energía [MJ]	Consumo de agua [g]	CO ₂ [kg]	NOx [kg]	PM-10 [kg]	SO ₂ [kg]	CO [kg]	Hg [g]	Pb [g]	Residuos Peligrosos Generados según RCRA [kg]	Potencial de toxicidad humana (cáncer)	Potencial de toxicidad humana (no cancerígeno)	
Asfalto	Tratamiento bituminoso múltiple	-	Con cemento asfáltico	24.36	0.00884	0.00132	0.00913	0.00319	0.14486	0.00514	0.00004	0.00173	0.365	5.77543	2270.2824
Asfalto	Tratamiento bituminoso múltiple	-	Con emulsión asfáltica	27.43	0.01008	0.00149	0.01016	0.00335	0.15397	0.00585	0.00004	0.00198	0.417	0.18380	2267.9976
Asfalto	Tratamiento bituminoso múltiple	-	Con emulsión asfáltica	17.99	0.00647	0.00098	0.00681	0.00242	0.11383	0.00376	0.00003	0.00127	0.266	0.14252	1758.8383

Tabla 26 Criterio medio ambiental para tratamientos que dependen de la estructura, aplicable al Aeródromo La Florida (continuación).

Tipo de pavimento	Actividad	Sección	Unidad	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036	2037	2038	2039	2040	2041	2042	2043	2044	2045	2046	2047	2048	2049	2050	Costo	
																														emisiones CO ₂	
Asfalto	Bacheo profundo	UO30-1	[USD/m ²]	0.9874	1.0944	1.2027	1.3096	1.4166	1.5235	1.6305	1.7388	1.8457	1.9527	2.0596	2.1665	2.2749	2.3818	2.4887	2.5957	2.7040	2.8109	2.9179	3.0248	3.1317	3.2401	3.3470	3.4539	3.5609	3.6692		
Asfalto	Bacheo profundo	UO30-2	[USD/m ²]	1.7677	1.9591	2.1530	2.3445	2.5359	2.7273	2.9188	3.1127	3.3041	3.4956	3.6870	3.8784	4.0724	4.2638	4.4552	4.6467	4.8406	5.0320	5.2235	5.4149	5.6063	5.8003	5.9917	6.1831	6.3746	6.5685		
Asfalto	Bacheo profundo	ZPCH-12	[USD/m ²]	0.9356	1.0370	1.1396	1.2409	1.3423	1.4436	1.5449	1.6476	1.7489	1.8502	1.9515	2.0529	2.1555	2.2568	2.3582	2.4595	2.5621	2.6635	2.7648	2.8661	2.9675	3.0701	3.1714	3.2728	3.3741	3.4767		
Asfalto	Bacheo profundo	ZPCH-30	[USD/m ²]	0.9356	1.0370	1.1396	1.2409	1.3423	1.4436	1.5449	1.6476	1.7489	1.8502	1.9515	2.0529	2.1555	2.2568	2.3582	2.4595	2.5621	2.6635	2.7648	2.8661	2.9675	3.0701	3.1714	3.2728	3.3741	3.4767		
Asfalto	Bacheo profundo	PL-B	[USD/m ²]	1.9749	2.1888	2.4054	2.6193	2.8332	3.0470	3.2609	3.4776	3.6914	3.9053	4.1192	4.3331	4.5497	4.7636	4.9775	5.1913	5.4080	5.6219	5.8357	6.0496	6.2635	6.4801	6.6940	6.9079	7.1218	7.3384		

Tabla 26 Criterio medio ambiental para tratamientos que dependen de la estructura, aplicable al Aeródromo La Florida (continuación).

Tipo de pavimento	Actividad	Sección	Unidad	Costo emisiones CO ₂					
				2025	2026	2027	2028	2029	
Asfalto	Bacheo profundo	PL-1	[USD/m ²]	1.9749	2.1888	2.4054	2.6193	2.8332	3.0470
		MPL-2	[USD/m ²]	1.8713	2.0739	2.2792	2.4819	2.6845	2.8872
		PL-F	[USD/m ²]	1.4556	1.6132	1.7729	1.9305	2.0882	2.2458
		PL-CAR	[USD/m ²]	1.8195	2.0165	2.2161	2.4132	2.6102	2.8073
		PL-HELLI	[USD/m ²]	1.8195	2.0165	2.2161	2.4132	2.6102	2.8073
Asfalto	Bacheo profundo			1.8195	2.0165	2.2161	2.4132	2.6102	2.8073
				1.8195	2.0165	2.2161	2.4132	2.6102	2.8073
				1.8195	2.0165	2.2161	2.4132	2.6102	2.8073
				1.8195	2.0165	2.2161	2.4132	2.6102	2.8073
				1.8195	2.0165	2.2161	2.4132	2.6102	2.8073
				1.8195	2.0165	2.2161	2.4132	2.6102	2.8073
				1.8195	2.0165	2.2161	2.4132	2.6102	2.8073
				1.8195	2.0165	2.2161	2.4132	2.6102	2.8073
				1.8195	2.0165	2.2161	2.4132	2.6102	2.8073
				1.8195	2.0165	2.2161	2.4132	2.6102	2.8073
				1.8195	2.0165	2.2161	2.4132	2.6102	2.8073
				1.8195	2.0165	2.2161	2.4132	2.6102	2.8073
				1.8195	2.0165	2.2161	2.4132	2.6102	2.8073

Tabla 26 Criterio medio ambiental para tratamientos que dependen de la estructura, aplicable al Aeródromo La Florida (continuación).

Tipo de pavimento	Actividad	Sección	Unidad	Costo emisiones CO ₂																												
				2025	2026	2027	2028	2029																								
Asfalto	Bacheo profundo	PL-CLA	[USD/m ²]	1.3520	1.4984	1.6467	1.7931	1.9396	2.0860	2.2324	2.3807	2.5271	2.6735	2.8200	2.9664	3.1147	3.2611	3.4075	3.5539	3.7023	3.8487	3.9951	4.1415	4.2879	4.4363	4.5827	4.7291	4.8755	5.0238			
		PL-SSEI	[USD/m ²]	1.7470	1.9362	2.1278	2.3170	2.5062	2.6954	2.8846	3.0762	3.2654	3.4546	3.6438	3.8330	4.0246	4.2138	4.4030	4.5922	4.7839	4.9731	5.1622	5.3514	5.5406	5.7323	5.9215	6.1107	6.2999	6.4915	6.6831	6.8747	7.0663
		RA-1	[USD/m ²]	1.7159	1.9017	2.0899	2.2758	2.4616	2.6474	2.8333	3.0215	3.2073	3.3931	3.5790	3.7648	3.9530	4.1389	4.3247	4.5105	4.6988	4.8846	5.0704	5.2562	5.4421	5.6303	5.8161	6.0020	6.1878	6.3736	6.5594	6.7452	6.9310
		RA-2	[USD/m ²]	1.7159	1.9017	2.0899	2.2758	2.4616	2.6474	2.8333	3.0215	3.2073	3.3931	3.5790	3.7648	3.9530	4.1389	4.3247	4.5105	4.6988	4.8846	5.0704	5.2562	5.4421	5.6303	5.8161	6.0020	6.1878	6.3736	6.5594	6.7452	6.9310
		RB	[USD/m ²]	1.9749	2.1888	2.4054	2.6193	2.8332	3.0470	3.2609	3.4776	3.6914	3.9053	4.1192	4.3331	4.5497	4.7636	4.9775	5.1913	5.4080	5.6219	5.8357	6.0496	6.2635	6.4801	6.6940	6.9079	7.1218	7.3357	7.5496	7.7635	7.9774

Tabla 26 Criterio medio ambiental para tratamientos que dependen de la estructura, aplicable al Aeródromo La Florida (continuación).

Tipo de pavimento	Actividad	Sección	Unidad	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036	2037	2038	2039	2040	2041	2042	2043	2044	2045	2046	2047	2048	2049	2050	Costo
																														emisiones CO ₂
		PI-1	[USD/m ²]	1.5457	1.7131	1.8826	2.0500	2.2174	2.3848	2.5522	2.7218	2.8892	3.0566	3.2240	3.3914	3.5609	3.7283	3.8957	4.0631	4.2327	4.4001	4.5675	4.7349	4.9023	5.0718	5.2392	5.4066	5.5740	5.7436	
		PI-2	[USD/m ²]	0.7728	0.8565	0.9413	1.0250	1.1087	1.1924	1.2761	1.3609	1.4446	1.5283	1.6120	1.6957	1.7805	1.8642	1.9479	2.0316	2.1163	2.2000	2.2837	2.3674	2.4511	2.5359	2.6196	2.7033	2.7870	2.8718	
		UP12-1	[USD/m ²]	1.1593	1.2848	1.4120	1.5375	1.6631	1.7886	1.9142	2.0413	2.1669	2.2924	2.4180	2.5435	2.6707	2.7962	2.9218	3.0473	3.1745	3.3001	3.4256	3.5511	3.6767	3.8039	3.9294	4.0550	4.1805	4.3077	
		UP12-2	[USD/m ²]	1.5457	1.7131	1.8826	2.0500	2.2174	2.3848	2.5522	2.7218	2.8892	3.0566	3.2240	3.3914	3.5609	3.7283	3.8957	4.0631	4.2327	4.4001	4.5675	4.7349	4.9023	5.0718	5.2392	5.4066	5.5740	5.7436	
		UO30-1	[USD/m ²]	0.7728	0.8565	0.9413	1.0250	1.1087	1.1924	1.2761	1.3609	1.4446	1.5283	1.6120	1.6957	1.7805	1.8642	1.9479	2.0316	2.1163	2.2000	2.2837	2.3674	2.4511	2.5359	2.6196	2.7033	2.7870	2.8718	

Tabla 26 Criterio medio ambiental para tratamientos que dependen de la estructura, aplicable al Aeródromo La Florida (continuación).

Tipo de pavimento	Actividad	Sección	Unidad	Costo emisiones CO ₂				
				2025	2026	2027	2028	2029
Asfalto	Bacheo superficial	UO30-2	[USD/m ²]	1.5457	1.7131	1.8826	2.0500	2.2174
		ZPCH-12	[USD/m ²]	0.7728	0.8565	0.9413	1.0250	1.1087
		ZPCH-30	[USD/m ²]	0.7728	0.8565	0.9413	1.0250	1.1087
		PL-B	[USD/m ²]	1.5457	1.7131	1.8826	2.0500	2.2174
		PL-I	[USD/m ²]	1.5457	1.7131	1.8826	2.0500	2.2174
2025				1.5457	1.7131	1.8826	2.0500	2.2174
2026				1.7131	1.8826	2.0500	2.2174	2.3848
2027				1.8826	2.0500	2.2174	2.3848	2.5522
2028				2.0500	2.2174	2.3848	2.5522	2.7218
2029				2.2174	2.3848	2.5522	2.7218	2.8892
2030				2.3848	2.5522	2.7218	2.8892	3.0566
2031				2.5522	2.7218	2.8892	3.0566	3.3914
2032				2.7218	2.8892	3.0566	3.3914	3.7283
2033				2.8892	3.0566	3.3914	3.7283	4.0631
2034				3.0566	3.3914	3.7283	4.0631	4.4001
2035				3.2240	3.5609	3.8957	4.2327	4.5675
2036				3.3914	3.7283	4.0631	4.4001	4.7349
2037				3.5609	3.8957	4.2327	4.5675	4.9023
2038				3.7283	4.0631	4.4001	4.7349	5.0718
2039				3.8957	4.2327	4.5675	4.9023	5.2392
2040				4.0631	4.4001	4.7349	5.0718	5.4066
2041				4.2327	4.5675	4.9023	5.2392	5.5740
2042				4.4001	4.7349	5.0718	5.4066	5.7436
2043				4.5675	4.9023	5.2392	5.5740	5.9122
2044				4.7349	5.0718	5.4066	5.7436	6.1111
2045				4.9023	5.2392	5.5740	5.9122	6.3111
2046				5.0718	5.4066	5.7436	6.1111	6.5111
2047				5.2392	5.5740	5.9122	6.3111	6.7111
2048				5.4066	5.7436	6.1111	6.5111	6.9111
2049				5.5740	5.9122	6.3111	6.7111	7.1111
2050				5.7436	5.9122	6.3111	6.7111	7.1111

Tabla 26 Criterio medio ambiental para tratamientos que dependen de la estructura, aplicable al Aeródromo La Florida (continuación).

Tipo de pavimento	Actividad	Sección	Unidad	Costo emisiones CO ₂				
				2025	2026	2027	2028	2029
Asfalto	Bacheo superficial	PL-SSEI	[USD/m ²]	1.5457	1.7131	1.8826	2.0500	2.2174
		RA-1	[USD/m ²]	1.5457	1.7131	1.8826	2.0500	2.2174
		RA-2	[USD/m ²]	1.5457	1.7131	1.8826	2.0500	2.2174
		RB	[USD/m ²]	1.5457	1.7131	1.8826	2.0500	2.2174
		MG-B	[USD/m ²]	1.5457	1.7131	1.8826	2.0500	2.2174
2050	5.7436	5.7436	5.7436	5.7436	5.7436	5.7436	5.7436	
2049	5.5740	5.5740	5.5740	5.5740	5.5740	5.5740	5.5740	
2048	5.4066	5.4066	5.4066	5.4066	5.4066	5.4066	5.4066	
2047	5.2392	5.2392	5.2392	5.2392	5.2392	5.2392	5.2392	
2046	5.0718	5.0718	5.0718	5.0718	5.0718	5.0718	5.0718	
2045	4.9023	4.9023	4.9023	4.9023	4.9023	4.9023	4.9023	
2044	4.7349	4.7349	4.7349	4.7349	4.7349	4.7349	4.7349	
2043	4.5675	4.5675	4.5675	4.5675	4.5675	4.5675	4.5675	
2042	4.4001	4.4001	4.4001	4.4001	4.4001	4.4001	4.4001	
2041	4.2327	4.2327	4.2327	4.2327	4.2327	4.2327	4.2327	
2040	4.0631	4.0631	4.0631	4.0631	4.0631	4.0631	4.0631	
2039	3.8957	3.8957	3.8957	3.8957	3.8957	3.8957	3.8957	
2038	3.7283	3.7283	3.7283	3.7283	3.7283	3.7283	3.7283	
2037	3.5609	3.5609	3.5609	3.5609	3.5609	3.5609	3.5609	
2036	3.3914	3.3914	3.3914	3.3914	3.3914	3.3914	3.3914	
2035	3.2240	3.2240	3.2240	3.2240	3.2240	3.2240	3.2240	
2034	3.0566	3.0566	3.0566	3.0566	3.0566	3.0566	3.0566	
2033	2.8892	2.8892	2.8892	2.8892	2.8892	2.8892	2.8892	
2032	2.7218	2.7218	2.7218	2.7218	2.7218	2.7218	2.7218	
2031	2.5522	2.5522	2.5522	2.5522	2.5522	2.5522	2.5522	
2030	2.3848	2.3848	2.3848	2.3848	2.3848	2.3848	2.3848	
2029	2.2174	2.2174	2.2174	2.2174	2.2174	2.2174	2.2174	
2028	2.0500	2.0500	2.0500	2.0500	2.0500	2.0500	2.0500	
2027	1.8826	1.8826	1.8826	1.8826	1.8826	1.8826	1.8826	
2026	1.7131	1.7131	1.7131	1.7131	1.7131	1.7131	1.7131	
2025	1.5457	1.5457	1.5457	1.5457	1.5457	1.5457	1.5457	

Tabla 26 Criterio medio ambiental para tratamientos que dependen de la estructura, aplicable al Aeródromo La Florida (continuación).

Tipo de pavimento	Actividad	Sección	Unidad	Costo emisiones CO ₂																										
				2025	2026	2027	2028	2029																						
Hormigón	Bacheo espesor 4cm	PL-J	[USD/m ²]	6.6479	7.3679	8.0972	8.8171	9.5371	10.2570	10.9770	11.7063	12.4262	13.1462	14.5861	15.3154	16.0354	16.7553	17.4753	18.2046	18.9245	19.6445	20.3644	21.0844	21.8137	22.5337	23.2536	23.9736	24.7029		
		PL-E	[USD/m ²]	3.3239	3.6839	4.0486	4.4086	4.7685	5.1285	5.4885	5.8531	6.2131	6.5731	6.9331	7.2931	7.6577	8.0177	8.3777	8.7376	9.1023	9.4623	9.8222	10.1822	10.5422	10.9069	11.2668	11.6268	11.9868	12.3514	12.7160
		PL-J	[USD/m ²]	3.3239	3.6839	4.0486	4.4086	4.7685	5.1285	5.4885	5.8531	6.2131	6.5731	6.9331	7.2931	7.6577	8.0177	8.3777	8.7376	9.1023	9.4623	9.8222	10.1822	10.5422	10.9069	11.2668	11.6268	11.9868	12.3514	12.7160
		PL-E	[USD/losa]	128.4568	142.3684	156.4607	170.3723	184.2840	198.1956	212.1072	226.1995	240.1112	254.0228	267.9344	281.8461	295.9384	309.8500	323.7616	337.6733	351.7656	365.6772	379.5888	393.5005	407.4121	421.5044	435.4160	449.3277	463.2393	477.3316	491.2432
		PL-J	[USD/losa]	128.4568	142.3684	156.4607	170.3723	184.2840	198.1956	212.1072	226.1995	240.1112	254.0228	267.9344	281.8461	295.9384	309.8500	323.7616	337.6733	351.7656	365.6772	379.5888	393.5005	407.4121	421.5044	435.4160	449.3277	463.2393	477.3316	491.2432
Hormigón	Reemplazo de losa	PL-E	[USD/losa]	128.4568	142.3684	156.4607	170.3723	184.2840	198.1956	212.1072	226.1995	240.1112	254.0228	267.9344	281.8461	295.9384	309.8500	323.7616	337.6733	351.7656	365.6772	379.5888	393.5005	407.4121	421.5044	435.4160	449.3277	463.2393	477.3316	491.2432
		PL-J	[USD/losa]	128.4568	142.3684	156.4607	170.3723	184.2840	198.1956	212.1072	226.1995	240.1112	254.0228	267.9344	281.8461	295.9384	309.8500	323.7616	337.6733	351.7656	365.6772	379.5888	393.5005	407.4121	421.5044	435.4160	449.3277	463.2393	477.3316	491.2432
		PL-E	[USD/losa]	128.4568	142.3684	156.4607	170.3723	184.2840	198.1956	212.1072	226.1995	240.1112	254.0228	267.9344	281.8461	295.9384	309.8500	323.7616	337.6733	351.7656	365.6772	379.5888	393.5005	407.4121	421.5044	435.4160	449.3277	463.2393	477.3316	491.2432
		PL-J	[USD/losa]	128.4568	142.3684	156.4607	170.3723	184.2840	198.1956	212.1072	226.1995	240.1112	254.0228	267.9344	281.8461	295.9384	309.8500	323.7616	337.6733	351.7656	365.6772	379.5888	393.5005	407.4121	421.5044	435.4160	449.3277	463.2393	477.3316	491.2432
		PL-E	[USD/losa]	128.4568	142.3684	156.4607	170.3723	184.2840	198.1956	212.1072	226.1995	240.1112	254.0228	267.9344	281.8461	295.9384	309.8500	323.7616	337.6733	351.7656	365.6772	379.5888	393.5005	407.4121	421.5044	435.4160	449.3277	463.2393	477.3316	491.2432



Tabla 27 Criterio medio ambiental para tratamientos superficiales.

	2050	0.0170	0.0196	0.0735	0.0850	0.2543
	2049	0.0165	0.0190	0.0713	0.0825	0.2467
	2048	0.0160	0.0185	0.0691	0.0800	0.2393
	2047	0.0155	0.0179	0.0670	0.0775	0.2319
	2046	0.0150	0.0173	0.0649	0.0750	0.2245
	2045	0.0145	0.0167	0.0627	0.0725	0.2170
	2044	0.0140	0.0162	0.0606	0.0700	0.2096
	2043	0.0135	0.0156	0.0584	0.0676	0.2022
	2042	0.0130	0.0150	0.0563	0.0651	0.1948
	2041	0.0125	0.0145	0.0541	0.0626	0.1874
	2040	0.0120	0.0139	0.0520	0.0601	0.1799
	2039	0.0115	0.0133	0.0498	0.0576	0.1725
	2038	0.0110	0.0127	0.0477	0.0552	0.1650
Costo emisiones CO ₂	2037	0.0105	0.0122	0.0455	0.0527	0.1576
	2036	0.0100	0.0116	0.0434	0.0502	0.1501
	2035	0.0095	0.0110	0.0412	0.0477	0.1427
	2034	0.0090	0.0104	0.0391	0.0452	0.1353
	2033	0.0085	0.0099	0.0369	0.0427	0.1279
	2032	0.0080	0.0093	0.0348	0.0403	0.1205
	2031	0.0075	0.0087	0.0326	0.0378	0.1130
	2030	0.0070	0.0081	0.0305	0.0353	0.1056
	2029	0.0065	0.0076	0.0284	0.0328	0.0982
	2028	0.0061	0.0070	0.0262	0.0303	0.0908
	2027	0.0056	0.0064	0.0241	0.0279	0.0833
	2026	0.0051	0.0058	0.0219	0.0253	0.0758
	2025	0.0046	0.0053	0.0198	0.0229	0.0684
Unidad		[UF/m]	[UF/m]	[UF/m]	[UF/m]	[UF/m]
-		Con emulsión	Con cemento	Con emulsión	Con cemento	Con emulsión
-		Grietas finas	Grietas finas	Grietas pequeñas	Grietas pequeñas	Grietas medianas
Actividad		Sello de grietas	Sello de grietas	Sello de grietas	Sello de grietas	Sello de grietas
Tipo de pavimento		Asfalto	Asfalto	Asfalto	Asfalto	Asfalto

Tabla 27 Criterio medio ambiental para tratamientos superficiales (continuación).

Tipo de pavimento	Actividad	Unidad	Costo emisiones CO ₂			
			2037	2038	2039	2040
			0.2941	0.2834	0.2091	0.6784
			0.2855	0.2750	0.2029	0.6584
			0.2769	0.2668	0.1968	0.6386
			0.2683	0.2585	0.1907	0.6188
			0.2597	0.2502	0.1846	0.5991
			0.2511	0.2419	0.1785	0.5790
			0.2425	0.2336	0.1724	0.5593
			0.2339	0.2254	0.1663	0.5395
			0.2253	0.2171	0.1602	0.5197
			0.2168	0.2088	0.1541	0.4999
			0.2081	0.2005	0.1479	0.4799
			0.1995	0.1922	0.1418	0.4601
			0.1909	0.1839	0.1357	0.4404
			0.1824	0.1757	0.1296	0.4206
			0.1737	0.1673	0.1235	0.4006
			0.1651	0.1591	0.1174	0.3808
			0.1565	0.1508	0.1113	0.3610
			0.1480	0.1425	0.1052	0.3413
			0.1394	0.1343	0.0991	0.3215
			0.1307	0.1259	0.0929	0.3015
			0.1221	0.1177	0.0868	0.2817
			0.1050	0.1011	0.0746	0.2421
			0.0964	0.0929	0.0685	0.2224
			0.0877	0.0845	0.0624	0.2023
			0.0792	0.0763	0.0563	0.1826
						0.1785
						0.2174
						0.2368
						0.2561
						0.2754
						0.2948
						0.3144
						0.3337
						0.3530
						0.3724
						0.3917
						0.4113
						0.4306
						0.4500
						0.4693
						0.4889
						0.5082
						0.5275
						0.5469
						0.5662
						0.5858
						0.6051
						0.6245
						0.6438
						0.6634
						0.6784
						0.6930
						0.7076
						0.7222
						0.7368
						0.7514
						0.7660
						0.7806
						0.7952
						0.8098
						0.8244
						0.8390
						0.8536
						0.8682
						0.8828
						0.8974
						0.9120
						0.9266
						0.9412
						0.9558
						0.9704
						0.9850
						0.9996
						1.0142
						1.0288
						1.0434
						1.0580
						1.0726
						1.0872
						1.1018
						1.1164
						1.1310
						1.1456
						1.1602
						1.1748
						1.1894
						1.2040
						1.2186
						1.2332
						1.2478
						1.2624
						1.2770
						1.2916
						1.3062
						1.3208
						1.3354
						1.3500
						1.3646
						1.3792
						1.3938
						1.4084
						1.4230
						1.4376
						1.4522
						1.4668
						1.4814
						1.4960
						1.5106
						1.5252
						1.5398
						1.5544
						1.5690
						1.5836
						1.5982
						1.6128
						1.6274
						1.6420
						1.6566
						1.6712
						1.6858
						1.7004
						1.7150
						1.7296
						1.7442
						1.7588
						1.7734
						1.7880
						1.8026
						1.8172
						1.8318
						1.8464
						1.8610
						1.8756
						1.8902
						1.9048
						1.9194
						1.9340
						1.9486
						1.9632
						1.9778
						1.9924
						2.0070
						2.0216
						2.0362
						2.0508
						2.0654
						2.0800
						2.0946
						2.1092
						2.1238
						2.1384
						2.1530
						2.1676
						2.1822
						2.1968
						2.2114
						2.2260
						2.2406
						2.2552
						2.2698
						2.2844
						2.2990
						2.3136
						2.3282
						2.3428
						2.3574
						2.3720
						2.3866
						2.4012
						2.4158
						2.4304
						2.4450
						2.4596
						2.4742
						2.4888
						2.5034
						2.5180
						2.5326
						2.5472
						2.5618
						2.5764
						2.5910
						2.6056
						2.6202
						2.6348
						2.6494
						2.6640
						2.6786
						2.6932
						2.7078
						2.7224
						2.7370
						2.7516
						2.7662
						2.7808
						2.7954
						2.8100
						2.8246
						2.8392
						2.8538
						2.8684
						2.8830
						2.8976
						2.9122
						2.9268
						2.9414
						2.9560
						2.9706
						2.9852
						2.9998
						3.0144
						3.0290
						3.0436
						3.0582
						3.0728
						3.0874
						3.1020
						3.1166
						3.1312
						3.1458
						3.1604
						3.1750
						3.1896
						3.2042
						3.2188
						3.2334
						3.2480
						3.2626
						3.2772
						3.2918
						3.3064
						3.3210
						3.3356
						3.3502
						3.3648

